

Universidad Autónoma de Madrid

Escuela Politécnica Superior



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

**HERRAMIENTAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA
ESTRUCTURA TEMPORAL DEL SEGUIMIENTO OCULAR
PARA LA RECOMENDACIÓN DE DIAGNÓSTICO DE
ENFERMEDADES**

Master Universitario en Investigación e Innovación en las TIC

**María Godín Lorenzo
Tutor: Pablo Varona Martínez**

30 de noviembre de 2020

HERRAMIENTAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA TEMPORAL DEL SEGUIMIENTO OCULAR PARA LA RECOMENDACIÓN DE DIAGNÓSTICO DE ENFERMEDADES

Autor: María Godín Lorenzo
Tutor: Pablo Varona Martínez

Grupo de Neurocomputación Biológica
Departamento de Ingeniería Informática
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid

30 de noviembre de 2020

Agradecimientos

Quiero agradecer este trabajo a Pablo, por ayudarme y apoyarme durante la realización de este Trabajo de Fin de Máster.

A todos mis compañeros de la universidad. Sobre todo quiero dar las gracias a mi compañera de Máster Alicia, que me ha ayudado y apoyado con todo su cariño y con las pizzas de los jueves para acabar esta etapa.

A Jon, por ayudarme durante la recta final de la realización de este proyecto con su apoyo y su cariño.

Muchas gracias.

Abstract

Abstract — Eye movement is a versatile and rich source of information used in multiple sectors such as medicine, marketing or psychology. It allows the indirect study of cognitive characteristics because of its close relation with cognitive processing and neurological mechanisms. These characteristics allow the use of eye movement for the early detection of cognitive diseases such as dyslexia.

Although eye-tracking devices save the eye record information with time series format, most state of art studies perform analysis and classification studies using averaged data obtained from time series processing. This causes the loss of relevant information from eye movements by discarding the temporal structure of the recordings.

The objective of this Master's Degree Thesis is the development of an application and a data collection and classification protocol focused on diseases diagnosis recommendation using eye tracking technologies. The proposed approach is based on standardized text readings using time series generated from eye movement.

Due to the current pandemic health situation, the test in a hospital had to be replaced by an alternative classification consisting in the identification of a person from his/her reading pattern. The system performed the eye-tracking time series recording in a group of volunteers and their corresponding classification using an algorithm that combines the multivariate time series of the position of both eyes and the diameter of the pupil.

Key words — eye tracking, dyslexia, attention deficit, time series analysis, multivariate pattern classification.

Resumen

Resumen — El movimiento ocular es una fuente de información versátil utilizada en múltiples sectores como la medicina, el marketing o la psicología, permitiendo el estudio indirecto de características cognitivas al estar tan relacionado con el procesamiento cognitivo y los mecanismos neurológicos, lo que puede permitir una detección precoz de enfermedades cognitivas como puede ser la dislexia.

Aunque los dispositivos de seguimiento ocular guarden la información del registro ocular como series temporales, en la mayoría de estudios normalmente se realiza un procesamiento para obtener los datos promediados y utilizarlos posteriormente en la clasificación, lo que provoca la pérdida de información relevante por descartar la estructura temporal de los registros.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Máster es el desarrollo de una aplicación y un protocolo de recogida de datos utilizando las tecnologías de seguimiento ocular para realizar una recomendación de diagnóstico de enfermedades a partir de lecturas de textos estandarizados con el uso de las series temporales generadas a partir del movimiento ocular.

Con este objetivo se ha diseñado un protocolo de registro de datos en un entorno hospitalario para la validación de este sistema en el contexto de la recomendación de diagnóstico.

Debido a la situación sanitaria actual de pandemia, se ha tenido que prescindir de la realización de la prueba en un entorno hospitalario, sustituyéndola por la identificación de una persona en base a su patrón temporal durante la lectura, realizando una clasificación mediante un algoritmo que combina las series temporales multivariadas de la posición de ambos ojos y del diámetro de la pupila.

Palabras clave — seguimiento ocular, dislexia, déficit de atención, evaluación y caracterización de patrones de lectura, clasificación de series temporales multivariadas.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación y objetivos	1
1.2. Alcance	2
1.3. Estructura del documento	3
2. Estado del Arte	5
2.1. Origen y trayectoria del seguimiento ocular	5
2.2. Lectura de textos	6
2.3. Análisis de seguimiento ocular	6
2.4. Dislexia y otras enfermedades cognitivas y su relación con el seguimiento ocular	8
2.5. Clasificación de series temporales	8
3. Diseño	11
3.1. Dispositivos	11
3.1.1. Colocación del dispositivo	13
3.1.2. Calibración	15
3.2. Prueba a realizar	16
3.2.1. Aplicación	16
3.2.2. Protocolo de recogida de datos.	18
3.2.3. Adquisición de datos de voluntarios	19
3.3. Objetivos del análisis.	20
4. Desarrollo	21
4.1. Alternativa a la prueba hospitalaria	21
4.2. Desarrollo de la prueba piloto	23
4.3. Validación de recogida de los datos	25
4.4. Aplicación	26
4.5. Clasificación de las series temporales oculares	27
5. Resultados	31
5.1. Objetivos de la evaluación	31
5.2. Prueba y tratamiento de los datos	31
5.3. Análisis de los resultados	33

6. Conclusiones	45
6.1. Conclusiones	45
6.2. Trabajo futuro	46
Bibliografía	47

Índice de tablas

3.1. Tabla de características de los dispositivos de seguimiento ocular analizados para este estudio.	14
5.1. Tabla con valores de error mínimo y medio para las validaciones realizadas en la sección de test y con los valores de OOB. Se incluyan junto a estos los valores de Jins y R para los valores de error mínimo. Los datos se han ordenado en base al valor medio del error de la sección de test. Se señala en negrita el mejor resultado de clasificación de acuerdo a este criterio. . .	34
5.2. Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de media de los ojos, ojo izquierdo, ojo derecho y tamaño de pupila. Se señala en negrita el mejor resultado de la clasificación.	35
5.3. Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de ojo izquierdo, ojo derecho y tamaño de pupila. Se señala en negrita el caso que corresponde al menor error de clasificación.	36
5.4. Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de ojo izquierdo y tamaño de pupila. .	37
5.5. Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de media de los ojos y tamaño de pupila.	38
5.6. Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R del atributo de la señal ocular referente al tamaño de la pupila.	39
5.7. Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de ojo derecho tamaño de pupila. . . .	40
5.8. Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de ojo derecho y ojo izquierdo.	41

5.9. Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de media de los ojos, ojo derecho y ojo izquierdo.	42
---	----

Índice de figuras

3.1.	Dispositivo de seguimiento ocular de bajo coste The EyeTribe.	12
3.2.	Dispositivo de seguimiento ocular Tobii X2-30.	12
3.3.	Ejemplo de calibración realizado con nuestra aplicación donde el sujeto ha de fijar su mirada en 9 puntos de la pantalla.	15
3.4.	Ejemplos de exactitud y precisión. Arriba izquierda se observa buena precisión y buena exactitud, al encontrarse los puntos azules, que representan el cálculo de la posición encima del círculo, que representa la posición a la que mira el usuario y no encontrarse los puntos dispersos, sino agrupados. Arriba derecha buena precisión, mala exactitud, al encontrarse los puntos azules no dispersos y fuera del círculo. Abajo izquierda buena precisión, mala exactitud, al encontrarse los puntos fuera del círculo pero agrupados. Abajo derecha, mala precisión, mala exactitud, al encontrarse los puntos fuera del círculo y dispersos	17
4.1.	Textos utilizados para las pruebas	24
4.2.	Ejemplo de calibración realizado con nuestra aplicación. En este caso se puede observar en la representación gráfica una mala calibración, al encontrarse los puntos que marcan las sacadas del usuario fuera del círculo, indicando tanto una mala exactitud como una mala precisión	26
4.3.	Ejemplo de árbol de decisión J_{ins} . Podemos observar como utiliza los atributos de las series temporales y el índice temporal como variables para realizar la diferenciación de las distintas instancias. Adaptado de [33] . . .	29
5.1.	Ejemplo gráfico de la división de los textos en segmentos para realizar el entrenamiento y el test del clasificador. Se ha superpuesto la señal del seguimiento ocular sobre el texto que leen los voluntarios. El color gris representa todo el registro de la lectura y el rojo la sección utilizada para generar una instancia para el clasificador	32
5.2.	Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de J_{ins} para los atributos de media de ojo izquierdo y ojo derecho, ojo izquierdo, ojo derecho y tamaño de pupila.	35
5.3.	Gráfica de error test y OOB para los atributos de ojo izquierdo, ojo derecho y tamaño de pupila.	36
5.4.	Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de J_{ins} para los atributos de ojo izquierdo y tamaño de pupila.	37

5.5. Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de Jins para los atributos de media de los dos ojos y tamaño de pupila.	38
5.6. Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de Jins para el atributo tamaño de pupila.	39
5.7. Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de Jins para los atributos ojo derecho y tamaño de pupila.	40
5.8. Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de Jins para los atributos ojo derecho y ojo izquierdo.	41
5.9. Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de Jins para los atributos media de los ojos, ojo izquierdo, ojo derecho.	42

1

Introducción

1.1. Motivación y objetivos

Las enfermedades de carácter cognitivo provocan una gran aflicción a la población mundial, provocando síntomas a las personas que las padecen que con una detección previa podrían atenuarse a medio o largo plazo, e incluso corregirse. La detección precoz de algunas de estas enfermedades es compleja al no mostrar una sintomatología muy pronunciada que permita el fácil diagnóstico de esta enfermedad.

Entre las técnicas que intentan abordar este problema, podemos encontrar las herramientas de seguimiento ocular, que facilitan una detección precoz y online a través del movimiento ocular y su relación con los procesos cognitivos y mecanismos neurológicos. Estas herramientas permiten el registro en tiempo real del movimiento ocular relacionado con tareas cognitivas de una forma transparente y se puede utilizar para identificar diferencias entre grupos de control de personas sanas y grupos de control de diversos trastornos cognitivos.

Los dispositivos de seguimiento ocular actualmente cuentan con una versatilidad que permite su uso en distintas disciplinas con distintos objetivos, ya sea para análisis o clasificación de datos, existiendo como gran inconveniente a su uso su elevado precio, al existir pocas alternativas de bajo coste.

La lectura de textos ha sido y es la forma de comunicación no verbal más extendida, teniendo un gran papel en la evolución cognitiva y cultural del ser humano. Por ello, puede ser interesante el uso de la misma para detectar anomalías en los patrones oculares asociados a tareas cognitivas.

Los estudios que utilizan el movimiento ocular como centro de su estudio, normalmente

realizan un procesamiento de la información con el objetivo de caracterizar medidas promediadas, sin hacer uso de la estructura temporal de los registros, perdiendo así información relevante que caracteriza la señal.

La motivación de este Trabajo de Fin de Máster consiste en el uso de tecnologías de seguimiento ocular para el desarrollo de una aplicación y un protocolo de recogida de datos para la realización de una recomendación de diagnóstico en base a la serie temporal íntegra capturada durante la lectura. Esta aplicación hubiera sido validada en una prueba en un ámbito hospitalario con la colaboración de voluntarios etiquetados como pacientes de dislexia y personas sanas de no ser por la crisis sanitaria actual.

Por ello la prueba fue sustituida por la realización de una identificación de personas en base al patrón ocular, manteniendo el planteamiento de uso de la señal temporal íntegra grabada durante el proceso de lectura. Esta identificación supone un buen punto de partida para el uso de la herramienta en un contexto clínico.

Como base para este desarrollo se ha hecho uso de la aplicación de recogida de datos de seguimiento ocular implementada en el Trabajo de Fin de Grado. Recogeremos información de seguimiento ocular en forma de serie temporal multivariada y la utilizaremos de forma íntegra en la clasificación de datos, comparando y analizando las distintas clasificaciones generadas a partir de las combinaciones de los atributos obtenidos en la grabación.

Los objetivos de este Trabajo de Fin de Máster son los siguientes:

- Realización de pruebas orientadas a la obtención de registros oculares etiquetados en formato de serie temporal durante la lectura.
- Posterior clasificación de las series temporales con el objetivo de obtener una identificación del lector en base al patrón ocular.
- Análisis de la clasificación de series temporales en base a sus atributos y sus distintas combinaciones.
- Obtención de conclusiones a partir del análisis realizado.

1.2. Alcance

El alcance de este proyecto es la normalización y extensión del uso de herramientas de recomendación de diagnóstico como apoyo a la valoración médica y a la detección precoz de enfermedades cognitivas como la dislexia a través del movimiento ocular, sobretudo en instituciones sanitarias o educativas.

El desarrollo del software realizado en este proyecto junto con dispositivos de seguimiento ocular de bajo coste, podría conseguir el acceso de esta tecnología a un precio asequible para facilitar la detección de patologías, tanto cognitivas como visuales, permitiendo el diagnóstico precoz con el que se puede aminorar o llegar frenar la afección.

1.3. Estructura del documento

El documento se organizará en los siguientes capítulos:

Estado del arte. En este capítulo se realizará un breve recorrido histórico con respecto al seguimiento ocular, después se realizará una explicación sobre el seguimiento ocular, los dispositivos que realizan este seguimiento y las distintas técnicas que utilizan. También se hablará sobre la dislexia y otras enfermedades cognitivas que muestran alteraciones en el patrón ocular. Posteriormente hablaremos sobre la clasificación de señales temporales al ser el medio de clasificación planteado para este estudio. Finalmente hablaremos sobre la evolución actual que están teniendo las tecnologías y dispositivos de seguimiento ocular.

Diseño. En este capítulo se explicará el diseño planteado y las motivaciones que lo respaldan.

Desarrollo. En este apartado se explicará detenidamente el desarrollo de la aplicación y las decisiones que finalmente se han tomado en el mismo. También se mostrará brevemente el funcionamiento de la aplicación y se explicará las distintas opciones que ofrece. Además, se explicará el planteamiento de la prueba de validación a realizar para la validación del desarrollo.

Pruebas y resultados. Se comentarán los resultados de clasificación obtenidos al probar la aplicación en distintos voluntarios.

Conclusiones. Se proporcionará un conjunto de conclusiones sobre el trabajo realizado y se desarrollará una idea con respecto al trabajo futuro.

2

Estado del Arte

2.1. Origen y trayectoria del seguimiento ocular

La caracterización del movimiento ocular lleva siendo un foco de interés desde hace más de un siglo. Los primeros estudios surgieron en la segunda mitad del siglo XIX [1, 2], y se centraban en la observación del ojo.

En base a la formalización del área de estudio del movimiento ocular, comenzaron a surgir nuevas herramientas con el objetivo de mejorar las herramientas de observación y recogida de datos y permitir el registro automatizado del movimiento ocular [3]. Entre las herramientas utilizadas, destacamos las siguientes:

Electro-oculografía Esta técnica se basa en la colocación de electrodos alrededor del ojo con el objetivo de medir la diferencia de potencial eléctrico generada. La electro-oculografía es la técnica de grabación de movimiento ocular que se ha usado durante más tiempo, contando con una gran popularidad en la década de los 70 [2]. Actualmente sigue siendo utilizado en gran variedad de estudios. [4, 5, 6].

Lentillas esclerales Se trata de unas lentes de contacto, más amplias que las comúnmente usadas, cubren la córnea y la esclerótica. Estas lentillas llevan incluidas una serie de elementos que permiten la realización de una grabación oculomagnética, como fósforos reflectantes, diagramas de línea o bobinas de alambre [2].

Reflexión de la pupila y la córnea Actualmente los dispositivos de seguimiento ocular utilizados mayoritariamente se encargan de grabar la reflexión de un rayo infrarrojo en la cornea y la pupila y así conseguir la información sobre la posición a la que está mirando el ojo.

Dentro de este modelo de dispositivo, encontramos diseños de distintos tipos, dispositivos que se colocan debajo del monitor de donde se esta realizando la visualización, integrados en el mismo monitor o colocados en la cabeza del usuario, que permiten una grabación del movimiento ocular en movimiento y sin necesidad de un ordenador adicional.

En sus inicios, los estudio del movimiento ocular buscaban entender la percepción visual, y posteriormente se centraron en la atención, hasta llegar a la actualidad en la que se puede ver cómo el uso del movimiento ocular se ha extendido en múltiples disciplinas, como el marketing, el estudio cognitivo o la medicina, en la que encontramos el uso del movimiento ocular para la recomendación de diagnóstico y cuenta con potencial suficiente como para poder usarse en la vida cotidiana [2, 7].

Con respecto a la recomendación de diagnóstico a partir del movimiento ocular, se hace uso de herramientas de predicción a partir de los parámetros obtenidos en la grabación del seguimiento ocular, con el objetivo de obtener un resultado en el que se indique una potencial afección de una enfermedad cognitiva o visual por parte de la persona analizada [8].

2.2. Lectura de textos

La lectura y escritura de textos es un pilar muy importante en nuestra cultura y nuestra evolución como personas en la sociedad, Su caracterización se puede utilizar como un indicador del posible impacto que algunas enfermedades tienen a nivel cognitivo, ya que permiten la observación de la interacción entre los procesos cognitivos frente a un estímulo externo constante.

Existen numerosos estudios en los que, haciendo uso de experimentos basados en la lectura de textos, se pueden obtener relaciones entre esta actividad y diferentes capacidades cognitivas, en personas adultas, jóvenes y niños [9, 10].

Es muy común el estudio del movimiento ocular basado en la lectura de textos, realizando un análisis del movimiento ocular relacionando valores promediados de la serie temporal con el texto. Tradicionalmente estos estudios se centraban en la lectura controlada de varias palabras expuestas individualmente, lo que elimina mucha información importante sobre el proceso de lectura útil para estudiar la actividad del movimiento ocular [11].

2.3. Análisis de seguimiento ocular

El movimiento ocular se puede dividir en dos tipos de movimientos base.

- Sacadas. Las sacadas consisten en pequeños movimientos rápidos encargados de

mover el foco de atención de un lado a otro. Permitiendo así el desplazamiento de la atención.

- Fijaciones. Consisten en una pausa de microsegundos en las que se recogerá información sobre lo visualizado.

A partir de estos conceptos básicos podemos elaborar conceptos mas elaborados, como el área de interés, el cual consiste en un área con una gran concentración de fijaciones, lo que nos indica que es un punto en el que se esta enfocando atención. Otro concepto interesante es la ventana de percepción, que indica el área visualizada por parte del usuario en una fijación, pudiendo ser más grande o más pequeña dependiendo de cada persona y sus condiciones.

Encontramos gran variedad de estudios que se encargan de investigar los comportamientos del movimiento ocular y sus características en distintas situaciones, como la lectura de textos, siendo la totalidad de términos conocidos para los lectores o con palabras desconocidas , la visualización de imágenes o vídeos, o pruebas de agilidad visual y comprensión basadas en ejercicios de visualización más elaborados.

Entre los estudios encontrados en este contexto destacamos los siguientes:

Con respecto al análisis de atención y aprendizaje, podemos destacar el trabajo de Aline Godfroid [10] que se caracterizaba en la lectura de un texto en inglés con términos en idioma persa desconocidos por el lector. Esta técnica se conoce como la técnica de la Naranja Mecánica. El objetivo del sometimiento controlado a estos términos desconocidos tiene como meta la observación de la adaptación a estos términos y el contraste entre otros conocidos para analizar el comportamiento ante un aprendizaje y la evolución del comportamiento ocular frente al tiempo de exposición. Se obtuvieron diferencias satisfactorias frente a la primera exposición y el resto viéndose una evolución en el tiempo de duración de las fijaciones concretamente.

También encontramos análisis centrados en la detección de áreas de interés en imágenes o vídeos, utilizándose muy comúnmente para la exposición de esta información un mapa de fijaciones donde se marcan las zonas observadas en un rango de tiempo concreto [12, 13, 14].

Finalmente otros estudios que hemos considerado interesantes han sido la comparación entre grupos de control y grupos de personas que padecían alguna afección, ya sean cognitivas o directamente visuales. Para realizar la comparación se realizaba a los grupos una serie de pruebas y posteriormente se comparaban las diferencias en las características del movimiento ocular entre los resultados de ambos grupos. Estas pruebas podían ser desde visualización de imágenes hasta test más elaborados [15, 16, 17]. Un ejemplo de este tipo de análisis es un trabajo realizado con niños con dislexia en China utilizando la técnica Stroop Color and Word Test (SCWT), consistente en la lectura del nombre de un color pintada de otro distinto, teniendo que leer el nombre e ignorando el color del texto [18]. En esta prueba, además de fijarse en parámetros mas genéricos como el tiempo o la precisión en la prueba, se extrajo información que permitió observar diferencias entre el grupo de control y el grupo de personas disléxicas en parámetros oculares como la

duración de la fijación, la amplitud de la sacada o la cantidad de fijaciones y sacadas realizadas.

2.4. Dislexia y otras enfermedades cognitivas y su relación con el seguimiento ocular

La atención de un ser humano es finita, por eso, involuntariamente, realizamos una selección de los estímulos que nuestro cerebro va a atender. El movimiento ocular facilita la percepción de esta diferenciación al realizar una recogida de información de poco en poco, llevando a cabo una integración de pequeñas secciones que dan una percepción completa [2]. Estas características permiten la observación de manifestaciones de distintos trastornos cognitivos, como podría ser la dislexia o el Alzheimer.

En el caso de las personas que padecen Alzheimer, concretamente se observa un déficit en los movimientos sacádicos, las fijaciones y la búsqueda de objetos. Observando sacadas más imprecisas y un aumento de sacadas largas [19].

La dislexia es el trastorno neurológico de mayor afección en niños de edad escolar y provoca dificultades con respecto a la atención mostradas entre otras disciplinas, en la comprensión lectora. El origen de esta enfermedad es en sí desconocido, y se ha modificado su modelo y origen con el paso de los años, pasando de un déficit del sistema fonológico a un modelo más multifactorial en el que se le añaden dificultades en otras capacidades como el lenguaje oral o la velocidad de procesamiento, pudiendo afectar en mayor o en menor grado a distintos individuos. También se observa una creciente evidencia con respecto a la frecuencia de encontrar dislexia con otros trastornos como hiperactividad o déficit de atención [20].

Esta enfermedad ha sido foco de estudios de seguimiento ocular desde hace décadas [21], lo que ha permitido que en la actualidad se sepa con bastante certeza las diferencias entre un grupo de control y un grupo con esta afección. El conocimiento de diferencias favorece la aparición de estudios de clasificación con respecto a este trastorno [22]. Es importante destacar que la mayor parte de los estudios promedian la estructura temporal de los registros realizados.

2.5. Clasificación de series temporales

Por lo tanto, tal y como se puede observar, aunque se han realizado investigaciones muy satisfactorias con respecto al análisis del movimiento ocular de personas con trastornos cognitivos, no se ha utilizado de forma tan frecuente el estudio de la señal ocular de forma íntegra [23], omitiendo información que podría ayudar a facilitar este diagnóstico preservando la estructura temporal de los datos registrados.

Es muy común la recolección de datos con formato de serie temporal, al estar la

gran mayoría de información sobre la actividad humana almacenada de esa manera, encontrando múltiples ejemplos en medicina, monitorización de rutinas humanas y finanzas entre otros.

En la amplia cantidad de estudios centrados en el análisis y clasificación del movimiento ocular, observamos cómo se centran en las características recogidas en la grabación, como son el patrón ocular de los dos ojos y el tamaño de pupila y realizan la extracción de información (cantidad de fijaciones, cantidad de sacadas, duración de la fijación, etc.).

Para la utilización de las características del movimiento ocular en formato de serie temporal, necesitaremos un clasificador de series temporales multivariadas. La gran ventaja de la clasificación en base a series temporales es que nos permite realizar una clasificación más completa, teniendo en cuenta mayores precedentes y factores más exactos que en la clasificación de datos discretos debido al contexto que aporta la señal, además de permitirnos observar relaciones entre distintos atributos durante el tiempo, aportándonos más información para generar un sistema de clasificación complejo [24].

La clasificación de series temporales es un reto en el que se ha trabajado desde décadas, habiendo un incremento de propuestas clasificadores de series temporales enorme en la última década, desarrollándose diversas técnicas de clasificación [25, 26], incluyendo los problemas relacionados con series temporales de origen biológico [27, 28, 29].

El formato más común de clasificadores de series temporales es el Vecinos Próximos (NN) junto con distintos algoritmos para calcular la distancia, siendo popular la función Dynamic Time Warping (DTW) al ser muy consistente y permitir la obtención de buenos resultados [25, 30].

También es muy común el uso de algoritmos con bases en conjuntos de clasificadores, como puede ser Random Forest o distintos clasificadores discriminatorios, entre los que destaca el algoritmo COTE (Collective Of Transformation-based Ensembles) [31] y su posterior optimización añadiendo un sistema de votación jerárquico (HIVE-COTE), al obtener buenos resultados de clasificación [25]. El gran contra de este algoritmo de clasificación es su gran coste computacional ($O(m^2l^4)$, siendo m la cantidad de series temporales y l la longitud), pudiendo ser engorroso su uso en conjuntos de datos muy grandes, siendo un objetivo pendiente de los desarrolladores el reducir su coste manteniendo su efectividad. [32]. También destacamos el algoritmo de Mustafa Gokce Baydogan y George Runger que utiliza Random Forest como algoritmo base para la clasificación, utilizando una representación simbólica de la señal temporal para la clasificación. También utiliza bootstrap para obtener un conjunto de árboles de decisión entrenado más diverso y aportar el indicador de error out-of-bag, que nos da información adicional sobre la clasificación y el sobreajuste [33].

Debido a su auge, desde hace años están apareciendo nuevas implementaciones que usan Deep learning para la realización de clasificación de señales temporales, usándose multitud de variantes, como el perceptrón multicapa o redes neuronales convolucionales. siendo implementaciones muy interesantes y competitivas con el resto de clasificadores que no usan estas tecnologías [30].

3

Diseño

En esta sección abordaremos el diseño de la implementación encargada de realizar la grabación del seguimiento ocular durante la lectura de un texto y de clasificar la señal temporal íntegra obtenida para la extracción de conclusiones con respecto al lector, ya sea una recomendación de diagnóstico que facilite la detección precoz de alguna afección de un trastorno neurológico, por ejemplo la dislexia, o una comprobación de identidad a partir del patrón de lectura.

Nos centraremos en este capítulo en la descripción de las distintas partes tanto de la aplicación como de la prueba a realizar, concretando los dispositivos de seguimiento ocular usados, la herramienta de grabación, el colectivo al que está dirigida la prueba y finalmente el método de clasificación seleccionado.

3.1. Dispositivos

Para la realización de este trabajo es necesario un dispositivo de seguimiento ocular que permita el registro del movimiento ocular durante la lectura de textos. Actualmente contamos con la disponibilidad de dos dispositivos de seguimiento ocular, el dispositivo de bajo coste de EyeTribe y el modelo X2-30 de Tobii, de alta gama, que se encuentran instalados en el laboratorio del Grupo de Neurocomputación Biológica.

El modelo de eye tracker de EyeTribe es un modelo interesante al tener un precio de venta muy reducido (99\$) que permite un mayor alcance y por tanto un mayor uso de los dispositivos de seguimiento ocular. Por desgracia este modelo ya no se fabrica en la actualidad, y no existe en el mercado un dispositivo que ofrezca la misma relación calidad/precio para el registro de actividad ocular.



Figura 3.1: Dispositivo de seguimiento ocular de bajo coste The EyeTribe.

El modelo X2-30 de Tobii, de un coste bastante más elevado que el dispositivo anterior (20.000\$) cuenta con un perfil técnico adecuado. Su fabricante es uno de los más populares del sector, lo que promueve la compatibilidad del software entre dispositivos. Además, este fabricante ha mostrado un interés reciente en nuevos diseños con un coste inferior que en un futuro podrían rebajarse incluso más para llegar a un público más amplio.



Figura 3.2: Dispositivo de seguimiento ocular Tobii X2-30.

Además de los dispositivos disponibles, se ha realizado un estudio de mercado de dispositivos de seguimiento ocular con precios más competitivos que pueden permitir un mayor alcance de uso de las tecnologías de seguimiento ocular. La información de las especificaciones de estos dispositivos, junto con su coste aproximado, la podemos encontrar en la Tabla 3.1. De los dispositivos mostrados, estudiamos dos de ellos en más detalle, ya que su coste permitiría su empleo en un estudio que involucrara varios hospitales, en concreto, el Tobii 4C y el GazePoint GP3.

Dispositivo periférico Tobii 4C fue diseñado para un uso recreativo con el objetivo de mejorar la experiencia del usuario en juegos de ordenador. Debido a su gran reducido coste, ha llamado la atención de investigadores que han estudiado este dispositivo para su uso en tareas de investigación. Contactando con Tobii nos informaron de que para que el dispositivo pudiera utilizar las SDK planteadas para la recogida de datos, era necesario el uso de una Upgrade Key, que incrementaba el coste del eye tracker de una forma

significativa, como podemos observar en la tabla 3.1, lo que nos hizo descartarlo como posible sustituto del dispositivo EyeTribe.

El siguiente dispositivo que destacamos debido a su adecuado coste es el dispositivo GazePoint GPR, al permitirse su compra sin software incluido, lo cual abarata mucho el precio final. El gran problema de esta opción es el tiempo requerido para la realización de un manejador que permita la recogida de datos en las condiciones experimentales de este trabajo.

El resto de dispositivos son aproximaciones muy interesantes que, aunque se salgan del planteamiento de dispositivo de seguimiento ocular de bajo coste, muestran una tendencia favorable a este objetivo, teniendo un precio bastante reducido en comparación con el dispositivo Tobii X2-30.

Para la realización de los experimentos en este trabajo, hemos decidido utilizar el dispositivo de Tobii X2-30. Esta elección se ha debido a que, aunque sea un modelo de precio elevado, se trata de un dispositivo de la compañía de tecnología de seguimiento ocular más globalizada en el mercado que ha planificado una reducción de precios en sus productos centrados en la investigación, como el dispositivo Tobii Pro Nano al que hemos hecho referencia en la tabla 3.1. También se ha tenido en cuenta el cese de la fabricación de dispositivos EyeTribe.

Por otro lado, todos los registros se realizarán en un ordenador con una pantalla de 1920x1080 px de resolución y 34.5x19.7 cm de tamaño.

3.1.1. Colocación del dispositivo

Todos los dispositivos de seguimiento ocular analizados para la realización de este trabajo son remotos, ya que de esta forma se garantiza una mayor comodidad para la lectura de textos para los usuarios al no ser un dispositivo invasivo y aportará facilidad a la hora de realizar las pruebas en caso de ser necesarios traslados.

Se colocará el dispositivo de seguimiento ocular debajo de la pantalla donde se realiza la prueba, centrado y posicionándolo en un ángulo que permita la grabación de los dos ojos. Para el dispositivo Tobii X2-30, según el manual de usuario, se indica que el ángulo no debe exceder los 37°. La colocación del dispositivo es importante al ser un factor que puede aumentar el grado de error en los registros, generando una pérdida de calidad de los datos producida por la no correcta captación de la reflexión de la luz infrarroja en el dispositivo.

Además, será importante que la distancia entre el dispositivo de seguimiento ocular y el participante en la prueba sea de aproximadamente 65 cm, al ser la distancia recomendada por el fabricante para obtener un registro óptimo que abarque todo el campo ocular durante la lectura de textos.

Eye tracker	Muestreo	Precisión	Exactitud	Calibración	Rango de distancia	Tamaño de pantalla	Precio
EyeTribe	30 y 60 Hz	0.5°	0.5	5, 9 y 12 puntos	45-75 cm	Desde 24"	99\$
Tobii X2-30	30Hz	0.4°	0.32°	5 puntos	50-100cm	Desde 27"	20.000€
Tobii 4C	90Hz	-	-	5 puntos	50 – 95 cm	Hasta 27"	169€ (+ 2400€ con Upgrade Key)
Tobii Pro Nano	60Hz	0.1°	0.3	5 puntos	45 - 85 cm	Hasta 19"	3200€
CAM30NT	25-40Hz	0.5°-0.1°	0.5-1°	-	50 - 75 cm	Hasta 19"	3245€
IrisBond Duo	30Hz	0.3°	0.5°	1, 5, 9 y 16 puntos	50-90 cm	10-24"	1590€
TM5 mini	96Hz	0.5°	-	-	40-75 cm	Hasta 22"	3335€
GazePoint GP3 HD	60 -150 Hz	-	0.5 - 1	5 y 9 puntos	-	Hasta 24"	1995€ (2990€ con SW)
GazePoint GP3	60Hz	0.1°	0.5-1°	5 y 9 puntos	50 - 80cm	Hasta 26"	690€ (1690€ con SW)

Tabla 3.1: Tabla de características de los dispositivos de seguimiento ocular analizados para este estudio.

3.1.2. Calibración

La calibración es un proceso crítico en la realización de pruebas de seguimiento ocular, con el que obtenemos el punto de referencia de nuestra grabación (*point of regard* o POR). El POR se obtendrá a partir de la interpolación de la relación entre una serie de estímulos simples y secuenciales que permiten relacionar la posición de la pupila con la coordenada de la pantalla donde se fija la mirada.

Es muy importante que este proceso se realice correctamente para cada persona que realiza el registro de actividad ocular, ya que una mala calibración puede aumentar el error de nuestra grabación y proporcionar datos imprecisos que pueden generar ruido, reduciendo la exactitud y la precisión del seguimiento ocular.

Normalmente el proceso de calibración se realiza mediante estímulos en la pantalla a los que la persona tiene que mirar para establecer una relación entre la localización del estímulo y la información espacial de la reflexión de luz de la córnea tal como la capta el dispositivo. Las calibraciones pueden variar en base a la cantidad de estímulos mostrados en pantalla, siendo 5 puntos una cantidad de puntos de calibración mínima bastante generalizada, existiendo varios estudios que tratan de buscar la mejor calibración en base a la cantidad de estímulos [34, 35].

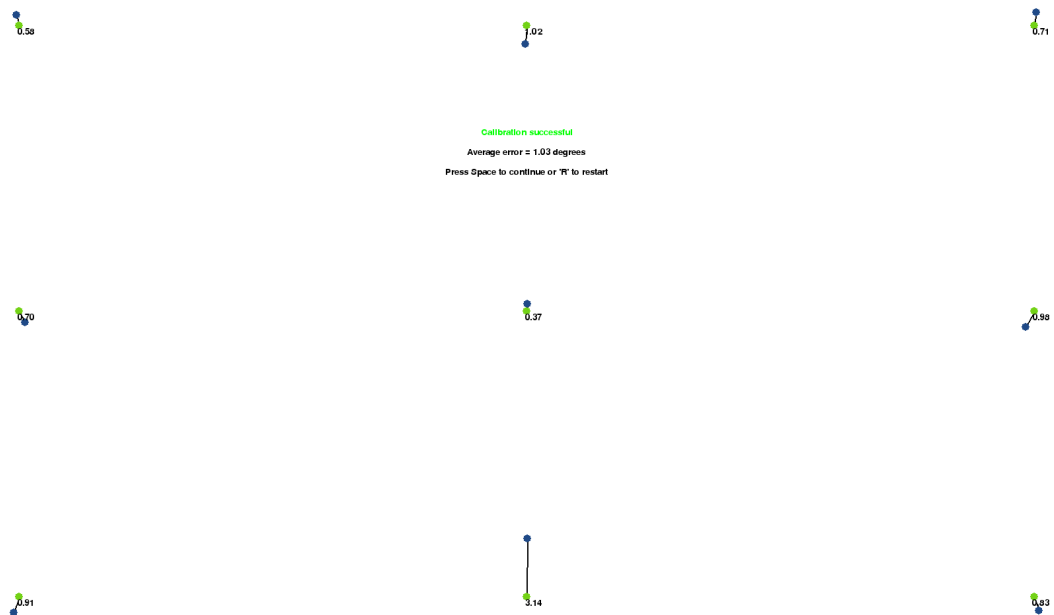


Figura 3.3: Ejemplo de calibración realizado con nuestra aplicación donde el sujeto ha de fijar su mirada en 9 puntos de la pantalla.

La calibración utiliza métricas como la exactitud y la precisión para informar al usuario de su calidad de una forma cuantitativa. Estas métricas son muy sensibles a las variaciones de usuario y de su entorno

Exactitud La exactitud se encarga de medir la diferencia entre la posición correspondiente al foco de mirada en la pantalla y la posición que ha calculado el dispositivo de seguimiento ocular. En los ejemplos de la Figura 3.4, una correcta exactitud corresponde a los ejemplos que cuentan con los puntos azules de la posición calculada por el eye tracker, dentro del círculo dibujado (que representa la posición a la que está mirando realmente el usuario), y malos ejemplos de precisión los que tienen los puntos fuera del círculo.

Precisión La precisión es la capacidad del dispositivo de seguimiento ocular de reproducir correctamente el punto de mira, realizando la medición de las variaciones en la grabación de la mirada, al no ser el movimiento del ojo una constante sino encontrarse en la mayoría del tiempo en movimiento. Se puede calcular de distintas maneras, pero la empleada por el dispositivo de seguimiento ocular Tobii utilizado es a partir de la media cuadrática o RMS de una cantidad de puntos sucesivos de una muestra, calculándose para cada uno de los ojos y para la media de los dos [36]. En los ejemplos de la Figura 3.4, una correcta precisión corresponde a los ejemplos que cuentan con los puntos azules representando la posición calculada por el eye tracker agrupados. Son malos ejemplos de precisión los que tienen los puntos azules dispersos.

Por tanto, se realizará una calibración previa a cada prueba con el objetivo de obtener la mejor grabación posible. Se utilizará como referencia los resultados gráficos obtenidos de la calibración realizada por la aplicación. Esta calibración internamente utilizará la SDK del dispositivo Tobii para que se encargue de esta funcionalidad.

3.2. Prueba a realizar

A continuación plantearemos el diseño de una aplicación y un protocolo de recogida de datos que, usando tecnologías de seguimiento ocular, permitan la realización una recomendación de diagnóstico.

3.2.1. Aplicación

Realizaremos una aplicación encargada de la grabación del patrón ocular durante la lectura, y la clasificación, con la previa preparación de datos de registro con el objetivo de generar ficheros de entrenamiento y de test para el clasificador.

Como base, utilizaremos la aplicación realizada en el Trabajo de Fin de Grado, utilizada para realizar una grabación y representar la evolución en el tiempo de la mirada sobre las líneas del texto leído, lo que permite evaluar en primera instancia la calidad del seguimiento ocular. Realizaremos una serie de modificaciones y mejoras en la aplicación, que permitirán la exportación de los ficheros y generar los conjuntos de datos de entrenamiento y de test para la clasificación de la serie temporal ocular.

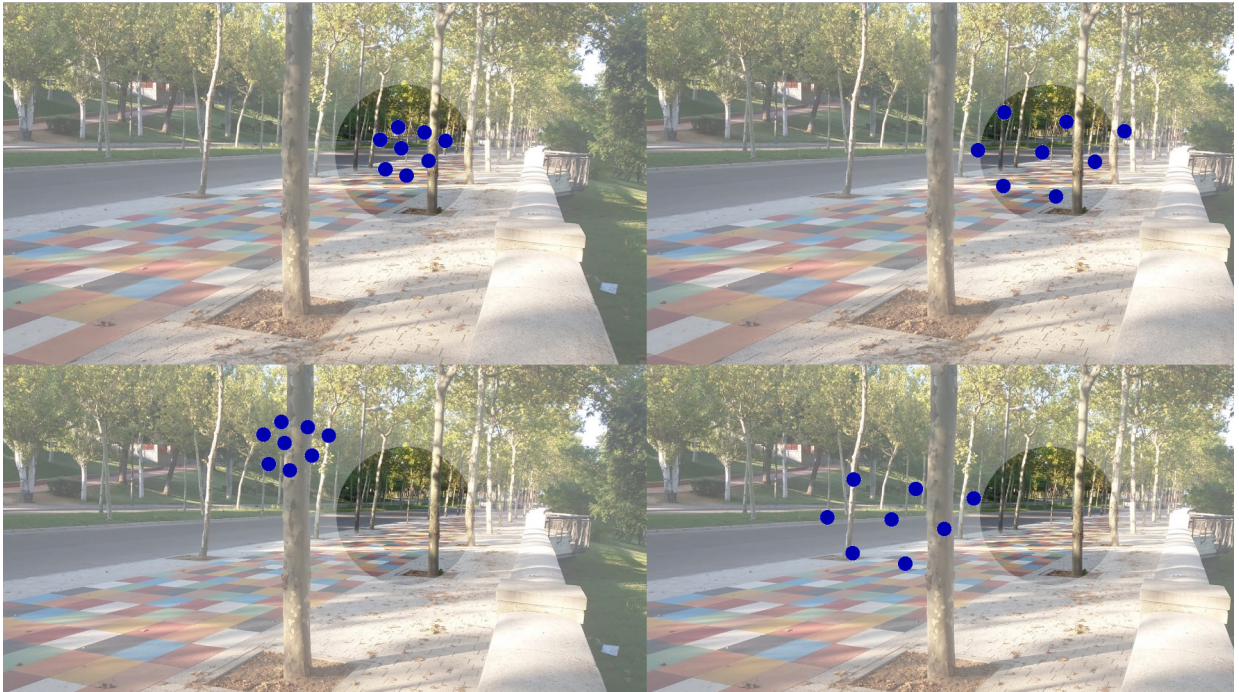


Figura 3.4: Ejemplos de exactitud y precisión. Arriba izquierda se observa buena precisión y buena exactitud, al encontrarse los puntos azules, que representan el cálculo de la posición encima del círculo, que representa la posición a la que mira el usuario y no encontrarse los puntos dispersos, sino agrupados. Arriba derecha buena precisión, mala exactitud, al encontrarse los puntos azules no dispersos y fuera del círculo. Abajo izquierda buena precisión, mala exactitud, al encontrarse los puntos fuera del círculo pero agrupados. Abajo derecha, mala precisión, mala exactitud, al encontrarse los puntos fuera del círculo y dispersos

Para la clasificación del conjunto de series temporales, utilizaremos el clasificador denominado SMTS (Multivariate Time Series Classification with Learned Discretization) de Mustafa Gokce Baydogan y George Runger [33], que nos ayudará en la realización de una clasificación de representaciones simbólicas de series temporales a partir de un algoritmo de clasificación Random Forest.

Este algoritmo cuenta con múltiples ventajas que han hecho que hayamos decidido utilizarlo. En primer lugar, hemos considerado una ventaja a valorar el hecho de que se trata de un clasificador de series temporales multivariable, lo cual nos permite realizar una clasificación a partir de las series temporales de las coordenadas de los dos ojos y de los correspondientes tamaños de pupila simultáneamente. Además, favorecerá el análisis sobre la combinación de atributos que permite una mejor clasificación.

Por otro lado, hemos considerado también una ventaja muy favorable el buen funcionamiento de la clasificación sin necesidad de realizar un preprocesado de las señales temporales, permitiendo la conservación de la señal del eye-tracker intacta, manteniendo toda la información de la estructura temporal del seguimiento ocular disponible.

Finalmente, una ventaja adicional de este algoritmo es que no requiere series temporales de la misma longitud para realizar la clasificación, ya que la velocidad de lectura es diferente en cada persona y no todas las grabaciones tienen porque tener la misma longitud.

3.2.2. Protocolo de recogida de datos.

En este apartado explicaremos el protocolo de recogida de datos diseñado para la realización de las pruebas.

La lectura de textos es uno de los principales medios de comunicación y aprendizaje del ser humano. Esta actividad se relaciona con diferentes capacidades cognitivas, lo cual la convierte en una prueba ideal para realizar grabaciones del movimiento ocular asociadas a la recomendación de diagnóstico de enfermedades, al poder asociarse con la manifestación del procesamiento cognitivo y los mecanismos neurológicos.

Por ello, hemos decidido que las pruebas a realizar se desarrollarán con la lectura de varios textos con el objetivo de capturar movimientos oculares que nos permitan obtener información significativa sobre la actividad cognitiva de la persona que realiza la lectura.

El protocolo de recogida de datos se basará en los siguientes pasos:

- Se explicará al usuario en qué consistirá la prueba, y se le pedirá una serie de datos importantes para el estudio, como puede ser la edad, si cuenta con una patología o no o si lleva gafas o lentillas.
- Se realizará de una calibración previa a la prueba con el objetivo de obtener la mejor recolección de resultados posibles con el menor error.

- Se realizará una prueba basada en la lectura de un texto breve con el objetivo de obtener un movimiento ocular cuyos patrones reflejen algunos de los procesos cognitivos relacionados con la comprensión del texto.
- Se repetirá el proceso de calibración y realización de la prueba todas las veces que sean necesarias, con el objetivo de obtener datos en distintas condiciones tanto por parte del texto (modificando su complejidad o la forma de su contenido, por ejemplo), o del entorno (modificando la iluminación o las condiciones de lectura del usuario)

El planteamiento inicial del protocolo era la realización de la prueba con un grupo de pacientes de dislexia y un grupo de control en un ambiente hospitalario, con el objetivo de obtener datos etiquetados de los usuarios: pacientes de dislexia y sanos. Debido a la situación sanitaria actual de pandemia, se ha tenido que descartar el desarrollo de este diseño al no ser posible su realización en el hospital.

Con el objetivo de mostrar una aproximación al proyecto mencionado, realizamos una prueba prototipo basada en el mismo protocolo de recogida de datos, pero llevándola a cabo en voluntarios sanos en la Universidad Autónoma de Madrid en vez de en un entorno hospitalario.

Esta prueba, buscará la identificación de un lector en base a su patrón ocular realizando una clasificación de las series temporales obtenidas a partir de la prueba de lectura grabada con dispositivo del seguimiento ocular.

3.2.3. Adquisición de datos de voluntarios

Con respecto al diseño de la prueba planteada para realizarse en un ambiente hospitalario, se buscaba la colaboración de niños de edad escolar, diferenciando dos grupos. Uno de ellos estará formado por niños afectados por la dislexia y otro por niños sanos.

Sería necesario para la aceptación de estos niños como voluntarios un reconocimiento médico de todos ellos, en el que se indicara de forma anonimizada los que sufren dislexia y los que son niños sanos sin ningún tipo de patología previa. Además, todos los niños deberán encontrarse en un rango de edad similar, favoreciendo una cierta homogeneidad en el nivel de lectura.

Con respecto a la prueba realizada en la Universidad Autónoma de Madrid, se aceptará a todo voluntario que decida participar en la prueba que cuente con capacidad lectora, intentando introducir voluntarios que cuenten con problemas visuales y lleven gafas.

A todos los participantes se les explicará la prueba detenidamente y se les pedirá un consentimiento para la realización de las mismas.

3.3. Objetivos del análisis

Tras la clasificación realizada con los ficheros de entrenamiento y de test, obtendremos una serie de resultados dependientes de los atributos utilizados y de los parámetros del clasificador. El análisis del conjunto de clasificaciones nos permitirá seleccionar las mejores configuraciones en relación a la clasificación.

El primer objetivo por tanto es estudiar qué configuración del clasificador es la que permite la obtención de los mejores resultados con el uso de las series temporales multivariadas obtenidas a partir del movimiento ocular.

El segundo objetivo es la búsqueda de los atributos que mejor discriminan la individualidad de cada sujeto en el movimiento ocular durante la lectura, asumiendo que representa adecuadamente los procesos cognitivos asociados al entendimiento del texto. Esto permitirá, por un lado, la obtención de una orientación sobre qué atributos en formato de serie temporal reflejan mejor el procesamiento cognitivo y, por otro lado, la validación de una herramienta que podría utilizarse en el futuro para la recomendación de diagnóstico de enfermedades como la dislexia y el déficit de atención utilizando estos atributos.

4

Desarrollo

En este apartado se explicará más profundamente las decisiones tomadas para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster a partir de los preámbulos ya comentados en el diseño.

Se explicarán los pasos y las decisiones adoptadas para la realización de un estudio que utiliza una aplicación y un protocolo de recogida de datos para la clasificación de series temporales de movimiento ocular. Tanto la aplicación como el protocolo tienen como objetivo recoger los datos que permitan a un clasificador discriminar los patrones de lectura que puedan utilizarse para la realización de una recomendación de diagnóstico para enfermedades de carácter cognitivo, o la comprobación de la identidad de un usuario a partir del patrón de lectura.

4.1. Alternativa a la prueba hospitalaria

El diseño de la prueba hospitalaria tenía como objetivo generar un modelo de clasificación que diferenciara los patrones oculares de personas que padecen dislexia y personas sana, a partir de la lectura de varios textos y la clasificación de las series temporales en base a ese modelo. De esta forma se obtendría una herramienta de recomendación de diagnóstico que permita la detección rápida, y a ser posible precoz, de esta afección cognitiva. La misma herramienta y protocolo se podría utilizar para la recomendación de diagnóstico de otras enfermedades utilizando las mismas premisas con su correspondiente conjunto de entrenamiento.

El planteamiento de esta prueba contemplaba realizar un registro de lectura de aproximadamente 100 individuos de edad escolar en un ambiente sanitario, concretamente

en un hospital, con el objetivo de obtener muestras etiquetadas de series temporales oculares de personas con y sin dislexia. Se había planificado una proporción equitativa entre el grupo de niños con dislexia y el grupo de control o de niños sanos.

El grupo de pacientes de dislexia se obtendría a partir de voluntarios con un diagnóstico médico de dislexia, redirigidos a través del hospital para la realización de esta prueba, asegurándonos que sólo padecen esta afección a nivel cognitivo a partir de un reconocimiento médico. El grupo de control se formaría con personas sanas con un reconocimiento médico previo que confirme esta situación. La búsqueda de voluntarios del grupo de control sería más complicada, al no haber muchas probabilidades de encontrar niños sanos a través del hospital, por lo que plantearíamos una búsqueda de voluntarios a partir de familiares y conocidos de los niños del grupo de dislexia. En caso de no ser suficientes, intentaríamos contactar con alguna institución educativa que nos permitiera la recolección de voluntarios para la prueba. Otro requisito para la realización correcta de esta prueba es que a los niños del grupo de control también se les realizara un reconocimiento médico con el objetivo de asegurarnos de que no contaran con ninguna patología previa que pudiera afectar a los resultados.

En este tipo de pruebas es también es muy importante la selección del rango de edades de los niños. Al encontrarse en una edad de rápido crecimiento, pueden encontrarse diferencias notables en la capacidad lectora en un rango muy pequeño de edad debido a la exigencia del curso escolar al que pertenezcan, lo que añadiría discrepancias entre los patrones de lectura que no tienen porque ser causadas por las dificultades generadas debido a la existencia de una patología. Por ello se decidió que el rango de edades admitido en esta prueba sería de entre 9 y 11 años de edad, al ser un rango en el que los niños ya han desarrollado en gran medida su capacidad lectora y las exigencias escolares son bastante similares.

La prueba se diseñó con la lectura de dos textos de distinto nivel de complejidad, teniendo en cuenta las capacidades lectoras de los niños. Uno de ellos es claramente más simple mientras que el otro cuenta con un poco más de complejidad. Esto permite analizar la desenvoltura en la lectura de estos dos textos, observar las diferencias generadas al subir la complejidad, y realizar una clasificación con las series temporales íntegras generadas a partir de la grabación de la lectura con un dispositivo de seguimiento ocular.

Desgraciadamente, debido a la situación sanitaria de pandemia actual, la realización de esta prueba se ha tenido que descartar, ante la imposibilidad de poder acceder a los recursos de las instituciones hospitalarias, tanto de pacientes con dislexia como de los reconocimientos médicos necesarios para su buen desarrollo.

Como alternativa a la realización de esta prueba, se planteó el desarrollo de una prueba prototipo alternativa que utilizara también el mismo protocolo de lectura por parte de nuestra aplicación. Para esta prueba se planteó la identificación de personas a partir de su patrón ocular en base a la lectura de los textos. El diseño, por tanto, es similar al de la prueba hospitalaria, ya que en ambos casos, las pruebas están orientadas a analizar diferencias en los patrones oculares relacionados con capacidades cognitivas, como pueden ser la comprensión y la atención, con el objetivo de realizar una discriminación a partir de la clasificación.

4.2. Desarrollo de la prueba piloto

Con objetivo de mostrar información al hospital sobre nuestro experimento, su alcance y su funcionamiento, se planteó una prueba piloto en la cual se pretendía mostrar el potencial de la identificación de patrones referentes al procesamiento cognitivo por parte de nuestra aplicación a partir de series temporales íntegras generadas por un dispositivo de seguimiento ocular.

El objetivo de esta prueba consistirá en el registro y la clasificación, en formato de serie temporal íntegra, del patrón ocular de lectura de múltiples voluntarios, obtenido a partir de un dispositivo eye tracker. El registro ocular se obtendrá durante la lectura de dos textos para poder identificar al lector en base a su patrón ocular, en el que se representa de forma implícita los procesos cognitivos utilizados para la lectura y la comprensión del contenido de estos.

Con respecto al desarrollo de la prueba, se realizará en un entorno académico, concretamente en el laboratorio B204 del Grupo de Neurocomputación Biológica de la Universidad Autónoma de Madrid, donde tendremos acceso tanto a voluntarios como a los recursos tecnológicos necesarios para la realización de la prueba. Dentro de este entorno académico, se buscarán voluntarios que cuenten con capacidades lectoras que les permitan la lectura de textos no muy complejos. En este experimento no será necesario un criterio tan estricto de selección como en el planteado en la prueba hospitalaria al tratarse de una clasificación centrada en la identificación del lector, en la que partimos de la premisa de que cada persona cuenta con un patrón de lectura único, y no de la detección y búsqueda de patrones más o menos estereotipados dentro de una misma patología que implica múltiples sujetos para el análisis de estos patrones.

Al ser una prueba que tenía como objetivo ser una demostración de las capacidades de la aplicación implementada como primer paso hacia la validación de la aplicación hospitalaria, se planteó una cantidad más reducida de voluntarios.

Por tanto, se reclutaron 22 voluntarios para la realización de este experimento, en los que buscamos un equilibrio con respecto a la cantidad de voluntarios que utilizasen gafas y los que no, para valorar también el patrón de personas con dificultades visuales en el experimento. Se descartó un voluntario debido a problemas durante la grabación de la prueba y otro debido a que no la completó. De los participantes restantes (14 chicos, 6 chicas), 11 llevaban gafas. La edad media de los participantes será de $\mu=23,764$ ($\sigma=3.02$).

El desarrollo de esta prueba es muy similar al de la prueba planteada inicialmente, realizando una lectura de dos textos (Figura 4.1), con diferentes complejidades para obtener datos de distintos desarrollos de lectura por parte del lector, y muestras con mayor diversidad en lo que respecta a la representación de procesos cognitivos en la lectura.

La lectura de los textos se realizó en silencio, en un ambiente con la menor cantidad de estímulos externos que pudieran generar distracciones durante la lectura y por tanto alterar la serie temporal obtenida en la grabación.

Finalmente, con los registros oculares obtenidos en formato de serie temporal, se

Pocahontas, era hija del jefe de la tribu, era una joven aventurera y de Espíritu libre. Amaba la tierra y a los espíritus que vivían en los animales, en los árboles y en el viento. Le encantaba escalar cumbres, bajar por la corriente de los ríos y correr con el viento por los bosques. Su padre quería que se casara con un guerrero llamado Kocoum. Sin embargo, la hermosa joven sentía que debía seguir por otros caminos.

Un día, Pocahontas fue a visitar a la abuela Sauce. "¡Mi padre quiere que me case con Kocoum, pero él es muy serio y últimamente he tenido un extraño sueño de una flecha que gira!", señaló la joven. La abuela que sabía que los sueños era fuente de gran sabiduría le dijo que tenía relación con su futuro.

(a) Texto de la primera prueba

El presente artículo de revisión expone aspectos fundamentales de la estructura de los costos unitarios hospitalarios para el desarrollo de sistemas de información de costos y gestión hospitalaria, siendo su objetivo prioritario la búsqueda de la optimización de los recursos hospitalarios desde un punto de vista económico-social. Se realizó un análisis teórico-bibliográfico de los sistemas análisis de costos hospitalarios, topdown y bottom-up, útiles en la asignación de los costos hospitalarios totales a cada servicio clínico. El análisis económico en atención en salud se divide en: análisis de minimización de costos, análisis de costo-beneficio, análisis costo-efectividad y análisis costo-utilidad. Se concluye sobre la necesidad de fortalecer este cálculo.

(b) Texto de la segunda prueba

Figura 4.1: Textos utilizados para las pruebas

realizaron varios estudios de eficiencia de la clasificación con variaciones en los atributos de entrada y en los parámetros de configuración del clasificador. Se realizó un análisis de la influencia de los parámetros de configuración del clasificador y de los atributos utilizados con respecto al éxito de la clasificación.

Por tanto, el esquema final de la prueba realizado es el siguiente:

- Se realizará una breve explicación sobre que es el eye tracker y el objetivo de la prueba y se le pedirá que se siente enfrente del puesto donde aparecerán los textos de lectura.
- Se realizará una calibración con el objetivo de obtener la mejor grabación posible. En caso de que la calibración de malos resultados, se colocará al voluntario para mejorar la captación de su mirada por parte del dispositivo de seguimiento ocular.
- El voluntario realizará la lectura del texto que se mostrará en pantalla durante 15 segundos en silencio.
- Finalizada la prueba se examinará que los resultados se hayan grabado correctamente y, en caso de que los resultados obtenidos muestren muchas incongruencias, se pedirá una repetición de la prueba.
- Tras la calibración, grabación y validación de la primera lectura, se realizará el mismo proceso con la segunda, permitiendo posteriormente al voluntario marcharse.
- Tras la recolección de todas las muestras, se realizará un etiquetado de los datos y se realizará una clasificación. Esta prueba se repetirá varias veces con el objetivo de obtener la mejor combinación de atributos posible.

4.3. Validación de recogida de los datos

La validación de las grabaciones realizadas cuenta con una importancia tan grande como las propias grabaciones, ya que es necesario asegurar la calidad de los datos utilizados en la clasificación y garantizar que las conclusiones que se obtienen no son debidas a artefactos en los registros.

Para las pruebas de seguimiento ocular, la forma de asegurarnos de que se realiza una grabación de la prueba lo más precisa posible es utilizando el proceso de calibración previo a la prueba. Como se ha explicado en la sección de diseño, este proceso implica la aparición de estímulos controlados en la pantalla que permiten relacionar el punto de mira del usuario y la coordenada de la pantalla donde se encuentra el estímulo.

La aplicación implementada utiliza la SDK del fabricante del eye tracker para la realización de la calibración. En esta caso, al emplear el dispositivo Tobii utilizaremos su sistema de clasificación, basado en una representación gráfica de los resultados de la exactitud y la precisión de la calibración. La exactitud indicará la diferencia entre el cálculo de la posición donde está mirando el usuario y la del estímulo, mientras que la

precisión se encargará de indicar cómo de reproducible es la recuperación del punto de mira.

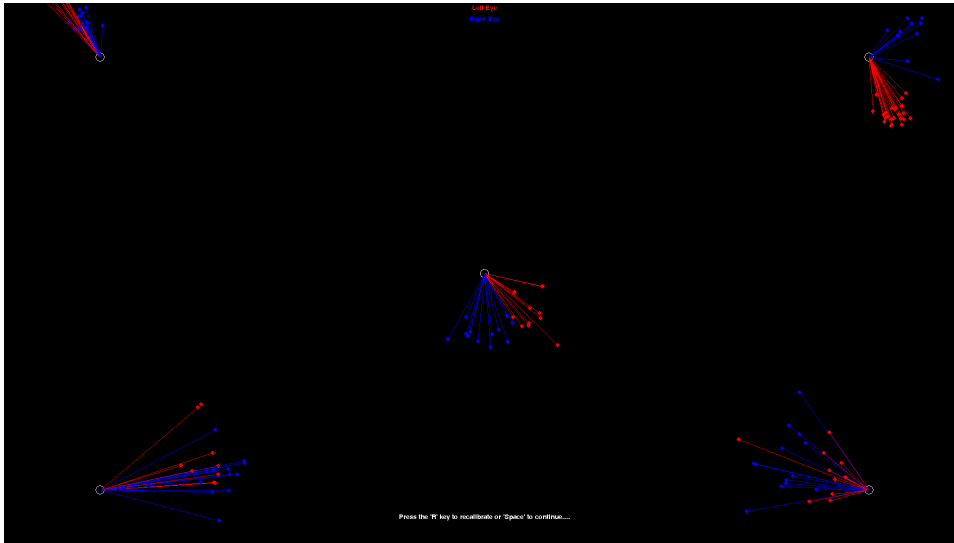


Figura 4.2: Ejemplo de calibración realizado con nuestra aplicación. En este caso se puede observar en la representación gráfica una mala calibración, al encontrarse los puntos que marcan las sacadas del usuario fuera del círculo, indicando tanto una mala exactitud como una mala precisión

Esta representación gráfica indica el punto correcto de calibración con círculos blancos, uno por cada estímulo que ha aparecido en pantalla, y las sacadas son representadas con vectores rojos y azules, representando el ojo derecho y el ojo izquierdo respectivamente. Estos vectores indican el desplazamiento de la posición calculada frente al estímulo, como se puede observar en la Figura 4.2, en la cual presentamos un ejemplo de una mala calibración.

Una buena calibración se encontrará representada por un conjunto de vectores contenidos en el círculo que representa el estímulo mostrado. Siendo una forma intuitiva y fácil de comprobar la calidad de la calibración tanto para el voluntario como para los investigadores.

Por tanto, para este estudio, se realizó en cada lectura de un texto un proceso de calibración previo con el objetivo de obtener el mejor registro posible. En caso de que la calibración no fuera buena, se solicitó al usuario reposicionarse y recolocar el eye tracker de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.

4.4. Aplicación

Para la realización de este experimento, es necesaria una interfaz gráfica que nos permita interactuar con el eye tracker y poder realizar una grabación de las pruebas de lectura, para su posterior clasificación.

La aplicación desarrollada en el Trabajo de Fin de Grado es una buena base sobre la que trabajar para la realización de este Trabajo de Fin de Máster, al ser una aplicación planteada para la ejecución de pruebas consistentes en la visualización de una imagen o un texto durante una cantidad de segundos determinada. También cuenta con un sistema de calibración integrado con el que se puede realizar una validación del dispositivo de seguimiento ocular y del entorno en el que se van a realizar las pruebas.

Otra característica que favorece el uso de esta aplicación es su capacidad de funcionamiento con múltiples dispositivos de seguimiento ocular, gracias al uso de la librería PyGaze [37] como encargada de interactuar con el dispositivo de seguimiento ocular para la realización de las pruebas. Esta librería actualmente cuenta con colaboradores que se encargan de actualizarla, permitiendo su uso con dispositivos que actualmente se encuentran en el mercado y garantizando su usabilidad con dispositivos que vayan a aparecer. Es por ello que se ha desarrollado una aplicación encargada de la realización de pruebas en base al desarrollo realizado en el Trabajo de Fin de Grado.

Para poder utilizar la aplicación, se han realizado una serie de mejoras en el flujo nominal que permiten facilitar su uso, como la aparición de más controles de errores y mensajes emergentes que permiten al usuario entender mejor la situación de la aplicación. Además se ha mejorado la realización de la calibración, modificando el color base de fondo a blanco en el uso del dispositivo Tobii para mejorar su resultado en una lectura de texto con fondo blanco.

Adicionalmente a las mejoras mencionadas, se han añadido una serie de módulos a la aplicación que nos permiten convertir los datos a un formato más adecuado para el clasificador y estructurar con mayor facilidad los ficheros de entrenamiento y test utilizados posteriormente para la clasificación de las series temporales, pudiendo generarse en base a un porcentaje indicado o especificando los ficheros concretos a introducir en el test.

4.5. Clasificación de las series temporales oculares

El último proceso de este desarrollo es la clasificación de las series temporales íntegras obtenidas durante la grabación del movimiento ocular en la lectura de textos. En la aplicación implementada durante el Trabajo de Fin de Grado no había ningún módulo encargado de la clasificación de las series temporales, centrándose en la visualización de una serie de imágenes donde se ofrecía una ayuda visual sobre la evolución temporal de la lectura para facilitar el diagnóstico de enfermedades de carácter cognitivo.

Como hemos comentado previamente en la sección de Diseño, hemos escogido el algoritmo de Mustafa Gokce Baydogan y George Runger de clasificación de representaciones simbólicas de series temporales multivariadas SMTS [33] para la realización del reconocimiento de patrones y la detección de los sujetos en base a su patrón ocular obtenido durante la lectura de textos.

Una serie temporal multivariada es una serie temporal que cuenta con una cantidad M de atributos y T observaciones. Siendo por tanto $x_m^n(t)$ la serie del atributo m de las

series n en el momento t .

Una representación de la matriz de la serie temporal multivariada por tanto sería:

$$X^n = [x_1^n, x_2^n, \dots, x_m^n, \dots, x_M^n]$$

donde

$$x_m^n = [x_m^n(1), x_m^n(2), \dots, x_m^n(T)]'$$

es la serie temporal del atributo m . Siendo el objetivo de este clasificador la clasificación de series temporales multivariadas con clases obtenidas en el desarrollo del entrenamiento.

Se considerará una instancia una serie temporal X_n con todos sus atributos. Una matriz de instancias $D_{NT \times M}$ es el resultado de la concatenación de M instancias X_n y cuenta con la siguiente estructura:

$$D_{NT \times M} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_M^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_M^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^n & x_2^n & \dots & x_M^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^N & x_2^N & \dots & x_M^N \end{bmatrix}$$

A partir de la matriz de instancias, se realiza una transformación al espacio $\Phi_{NT \times (2M+1)}$, que añade las columnas adicionales del índice de registro de la muestra y la diferencia de $x_m^n(t)$ y $x_m^n(t-1)$ si el valor es numérico. La fila de Φ para la serie multivariada n en la observación t es:

$$[t, x_1^n(t), x_1^n(t) - x_1^n(t-1), \dots, x_M^n(t), x_M^n(t) - x_M^n(t-1)]$$

Las diferencias sólo se incluirán cuando el atributo sea numérico y no estará disponible para la primera muestra de la serie temporal, por lo que se asume como un campo vacío (o missing value). El añadir el índice de las observaciones permite realizar la clasificación en base al tiempo como se podría hacer con cualquier otro atributo de la señal temporal.

Este algoritmo se basa en un paradigma de clasificación supervisada, en la cual se realizará una representación simbólica del espacio Φ generado a partir de las señales temporales multivariadas, haciendo uso de sus patrones más característicos, entre los que se incluye la secuencia temporal al estar contemplado el índice temporal en los parámetros de entrada del clasificador a partir de Random Forest ($RFins$) como se puede ver en la Figura 4.3. Esta representación simbólica puede ser modificada en base al alfabeto utilizado, que se determinará por la cantidad de nodos (R) que tengan los árboles de decisión. La limitación de la cantidad de nodos limitará el crecimiento del árbol de decisión e indirectamente, evitará el sobreajuste. La representación simbólica también se verá afectada por la cantidad de árboles de decisión que contenga el Random Forest encargado de procesar las instancias (J_{ins}), que permitirá la generación de más o menos

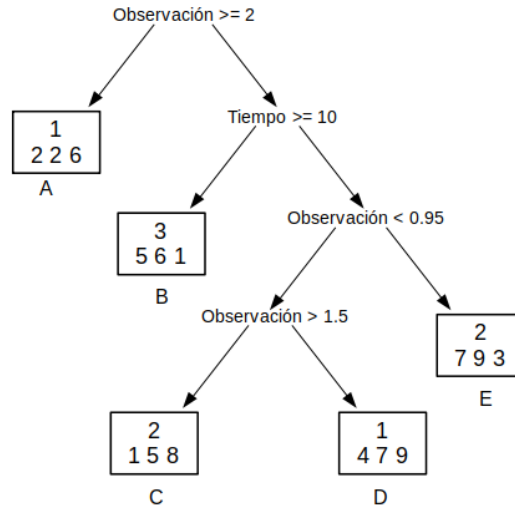


Figura 4.3: Ejemplo de árbol de decisión J_{ins} . Podemos observar como utiliza los atributos de las series temporales y el índice temporal como variables para realizar la diferenciación de las distintas instancias. Adaptado de [33]

representaciones simbólicas de las series temporales.

Posteriormente, a partir de la representación simbólica de las señales, se utilizará otro Random Forest para su clasificación. Se podrá variar la cantidad de árboles (J_{ts}) que contenga el conjunto encargado de la clasificación.

El uso de Random Forest como base de este clasificador aporta grandes ventajas con respecto a la complejidad computacional del algoritmo, permitiendo que sea tan eficiente como el uso de un único árbol de decisión. Además, permite que mantenga la robustez frente al ruido y *outliers* en la clasificación de series temporales multivariadas.

La representación simbólica de la señal antes de realizar la clasificación permite la detección y localización de patrones comunes a partir de las señales temporales integra [38]. Realizándose por tanto una extracción de patrones a partir de la totalidad de la señal, sin haber extraído información a través de un preprocesado previo a la clasificación.

Otra ventaja que presenta este algoritmo es que funciona muy bien con conjuntos de datos grandes [38], siendo interesante para pruebas de seguimiento ocular con muchos voluntarios, como la prueba planteada a realizar en un entorno hospitalario.

Hemos hecho uso de la implementación del algoritmo en R accesible en www.mustafabaydogan.com.

Esta implementación realizará 10 ejecuciones del algoritmo modificando los valores de Jins y R en base a los valores introducidos por el usuario y mostrando múltiples clasificaciones en cada ejecución.

Para realizar una ejecución, se pasarán como parámetros de entrada los ficheros de entrenamiento y validación generados por la aplicación, los distintos valores de Jins,

que indicarán la cantidad de árboles de decisión utilizados para la generación de la representación simbólica y el tamaño del alfabeto (R). Tanto la cantidad de árboles como el tamaño del alfabeto se introducirán como una lista con múltiples valores, para permitir la generación de clasificadores que cuenten con varias combinaciones de estos parámetros y así evaluar su efecto en el éxito de la clasificación de las series temporales multivariadas del seguimiento ocular.

5

Resultados

5.1. Objetivos de la evaluación

El objetivo de las pruebas de control realizadas en este Trabajo de Fin de Máster es demostrar que, a partir de los datos adquiridos durante el seguimiento ocular de la lectura y mediante un clasificador de series temporales multivariadas, se puede caracterizar al lector de acuerdo a su patrón espacio-temporal de lectura sin un preprocesamiento adicional utilizando la aplicación descrita en los capítulos anteriores. Este resultado avala como punto de partida el uso de la aplicación en un contexto biomédico en el futuro.

5.2. Prueba y tratamiento de los datos

Debido a la situación sanitaria actual, no se pudo realizar la prueba planteada inicialmente a niños pacientes de dislexia, por ello en esta sección mostraremos los resultados de la prueba piloto, realizada en la Universidad Autónoma de Madrid, que consistía en la lectura de los textos de la Figura 4.1 por parte de un conjunto de 20 voluntarios para posteriormente realizar una clasificación del seguimiento ocular en base a las series temporales generadas durante los registros.

Para la optimización del uso de las series temporales obtenidas durante la lectura de los voluntarios, hemos decidido realizar una fragmentación de cada una de las muestras en cuatro secciones, como se muestra en la Figura 5.1, obteniendo así más instancias para realizar la clasificación. Se ha decidido la fragmentación en cuatro secciones para aumentar la cantidad de series temporales de entrenamiento con el objetivo de mejorar la clasificación y favorecer la robustez de los resultados en la fase de test. Con respecto a

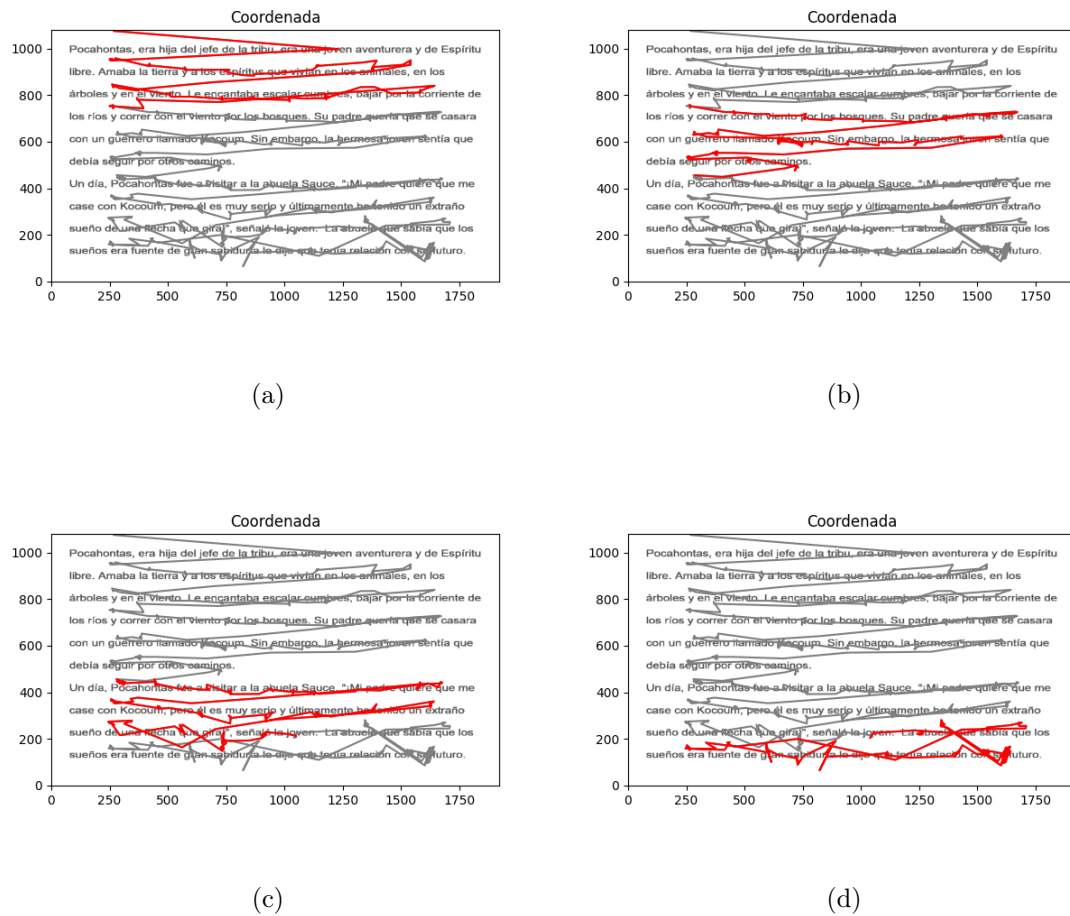


Figura 5.1: Ejemplo gráfico de la división de los textos en segmentos para realizar el entrenamiento y el test del clasificador. Se ha superpuesto la señal del seguimiento ocular sobre el texto que leen los voluntarios. El color gris representa todo el registro de la lectura y el rojo la sección utilizada para generar una instancia para el clasificador

la duración de los segmentos, observando el tamaño de las grabaciones y la estructura de los textos, hemos considerado la división en cuatro partes idónea al presentar en todas las instancias diversas características de lectura comunes en cada instancia, como la lectura de una palabra, de una o varias líneas y el salto de línea. El encapsulando en cada fragmento de comportamientos similares facilitará la detección de un patrón.

Como se puede observar en la Figura 5.1, la última sección de texto en el ejemplo que se ilustra aparentemente cuenta con un tamaño menor que el resto. Esto es debido a que el usuario, cuando terminó de leer, mantuvo la mirada al final del texto, siendo representado con una mayor fijación en ese momento. Las secciones de texto se repartirán de tal forma que una de ellas se utilice para la parte de test y el resto para el entrenamiento del clasificador, siendo la de sección utilizada para el test del clasificador una sección intermedia del texto de la figura 4.1b, al mostrar un comportamiento más constante y más representativo del patrón ocular que la primera o la última sección.

5.3. Análisis de los resultados

De las pruebas realizadas a los voluntarios, se obtuvieron muestras de información sobre su seguimiento ocular y sus patrones oculares en formato de señal temporal multivariada con los siguientes atributos:

Media de los ojos. El propio software de recogida de datos nos genera la posición promedio de los ojos izquierdo y derecho de cada registro capturado por el dispositivo de seguimiento ocular durante la lectura. La posición se devuelve en coordenadas, siendo el eje X la altura y el eje Y la anchura de la pantalla.

Ojo derecho. Registro en formato coordenada del ojo derecho.

Ojo izquierdo. Registro en formato coordenada del ojo izquierdo

Tamaño de pupila. Registro del tamaño de las pupilas medidas en píxeles.

A partir de los atributos de las series temporales multivariadas, utilizando el algoritmo SMTS de clasificación de señales temporales planteado por Mustafa Gokce Baydogan y George Runger [33] y explicado anteriormente en la sección de desarrollo, se han implementado varios clasificadores entrenados y probados con las señales temporales obtenidas del movimiento ocular de los voluntarios, generando variaciones en la configuración de los clasificadores a partir de la modificación del tamaño del alfabeto para realizar la representación y la cantidad de árboles utilizados para la traducción simbólica de las señales.

Para la interacción con el clasificador, se generarán a partir de los ficheros obtenidos de las pruebas a los voluntarios el fichero de datos para el entrenamiento y el fichero de datos para el test con distintas instancias de las señales temporales en su interior.

Se hará uso de la implementación en R del algoritmo de Mustafa Gokce Baydogan y George Runger [33] facilitada en la web www.mustafabaydogan.com.

La implementación usada generará por cada ejecución 10 clasificadores distintos, realizando por tanto 10 clasificaciones completas (entrenamiento y test). Los distintos clasificadores cuentan con variaciones en la cantidad de términos utilizados para la representación simbólica de las señales temporales (R) y la cantidad de árboles de decisión (Jins) utilizados para decidir la representación de cada instancia. Al permitir la introducción de una lista de valores para cada parámetro, el algoritmo internamente realizará una combinatoria de estos valores y conseguirá distintas combinaciones de estas propiedades en cada clasificador, ofreciendo una mayor diversidad de comportamiento en los clasificadores que se analizará en base a su efecto en el resultado de clasificación de nuestro conjunto de datos.

Se introducirán como valores posibles de R y de Jins 20, 40, 60, 80 y 100 en ambos casos.

Prueba	Error mínimo	Jins Error	R Error	OOB mínimo	Jins OOB	R OOB	media Error	media OOB
Ojo izquierdo, ojo derecho y tamaño de pupila.	0.2	20	80	0.3285	40	80	0.2625	0.351
Media de los ojos, ojo izquierdo, ojo derecho y tamaño de pupila.	0.2	40	80	0.3178	80	100	0.273	0.3695
Ojo derecho y tamaño de pupila.	0.225	40	100	0.3284	60	80	0.2834	0.3578
Ojo izquierdo y tamaño de pupila.	0.25	80	100	0.35	80	100	0.29	0.3795
Media de los ojos y tamaño de pupila.	0.2	20	80	0.35	80	100	0.287	0.3657
Ojo izquierdo y ojo derecho.	0.275	80	40	0.4892	80	100	0.3424	0.5313
Pupila.	0.28	80	80	0.3302	80	60	0.3425	0.3608
Media de los ojos, ojo izquierdo y ojo derecho.	0.2	20	60	0.469	100	60	0.367	0.5298

Tabla 5.1: Tabla con valores de error mínimo y medio para las validaciones realizadas en la sección de test y con los valores de OOB. Se incluíran junto a estos los valores de Jins y R para los valores de error mínimo. Los datos se han ordenado en base al valor medio del error de la sección de test. Se señala en negrita el mejor resultado de clasificación de acuerdo a este criterio.

Además de las 10 clasificaciones realizadas en cada ejecución, decidimos ejecutar 10 veces la implementación con los mismos parámetros de entrada para asegurar una mayor robustez en los datos obtenidos en la clasificación mostrados en este trabajo.

Para el análisis de los resultados se utilizarán las métricas obtenidas de las clasificaciones de los distintos clasificadores, realizándose una media ponderada entre los resultados de los clasificadores que muestren las mismas características. Nos centraremos concretamente en el error de clasificación en la ejecución del test y el error out-of-bag (OOB) que se trata de una validación extra realizada a subconjuntos de árboles de decisión con atributos de entrenamiento no usados para su aprendizaje.

En primer lugar, observamos en la Tabla 5.1 que en la totalidad de los casos de test, para la mayoría de las instancias clasificadas, se consigue una clasificación correcta de la persona que han realizado la lectura, aunque el error de test obtenido alcanza valores relativamente altos (0.2 es el mínimo conseguido).

Aunque el error OOB en la mayoría de los casos es mayor que el error de test, observamos una tendencia parecida en la que se realiza una clasificación correcta del lector en la mayoría de los casos, pudiendo explicarse esta diferencia en la cantidad de datos utilizados para el error OOB y la cantidad de árboles de decisión utilizados para realizar la clasificación.

Realizando un análisis más detenido de los atributos de las series temporales en el clasificador observamos que en los ejemplos en los que se omite el tamaño de la pupila para realizar la clasificación mostrados en las Tablas 5.8 y 5.9, se obtienen peores resultados de clasificación manifestados tanto en el error de test como en el error OOB.

Encontramos referencias que nos indican que el tamaño de la pupila varía en respuesta

Jins	R	Error	OOB
20.0	40.0	0.275	0.4035
20.0	60.0	0.3	0.429
20.0	80.0	0.3	0.3425
20.0	100.0	0.25	0.3785
40.0	20.0	0.325	0.3715
40.0	40.0	0.2625	0.4215
40.0	60.0	0.3	0.379
40.0	80.0	0.2	0.407
40.0	100.0	0.275	0.3982
60.0	20.0	0.275	0.3855
60.0	40.0	0.28	0.3758
60.0	60.0	0.2667	0.3678
60.0	80.0	0.25	0.382
60.0	100.0	0.2625	0.3177
80.0	20.0	0.3125	0.3734
80.0	40.0	0.2667	0.343
80.0	60.0	0.2625	0.3462
80.0	80.0	0.275	0.3631
80.0	100.0	0.2375	0.3552
100.0	20.0	0.275	0.391
100.0	40.0	0.27	0.3556
100.0	60.0	0.265	0.3693
100.0	80.0	0.25	0.3636
100.0	100.0	0.2833	0.357

Tabla 5.2: Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de media de los ojos, ojo izquierdo, ojo derecho y tamaño de pupila. Se señala en negrita el mejor resultado de la clasificación.

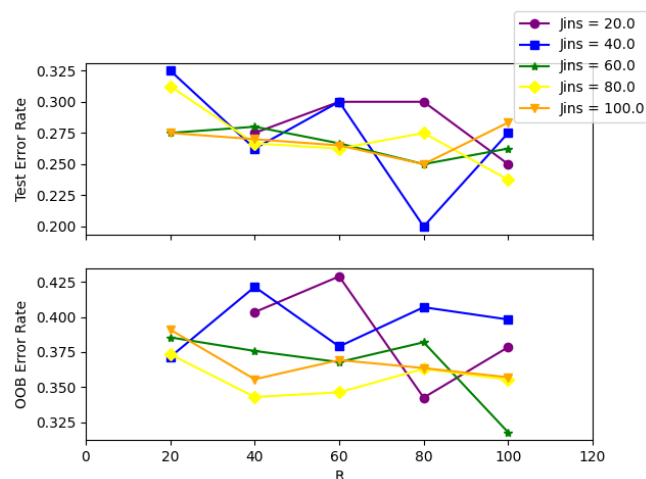


Figura 5.2: Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de Jins para los atributos de media de ojo izquierdo y ojo derecho, ojo izquierdo, ojo derecho y tamaño de pupila.

Jins	R	Error	OOB
20.0	20.0	0.25	0.3948
20.0	40.0	0.25	0.357
20.0	80.0	0.2	0.393
20.0	100.0	0.275	0.344
40.0	20.0	0.25	0.407
40.0	40.0	0.3	0.382
40.0	60.0	0.25	0.3543
40.0	80.0	0.25	0.3285
40.0	100.0	0.25	0.35
60.0	20.0	0.2625	0.3805
60.0	40.0	0.2857	0.355
60.0	60.0	0.25	0.34
60.0	80.0	0.26	0.347
60.0	100.0	0.2667	0.3382
80.0	20.0	0.2857	0.3613
80.0	40.0	0.27	0.3514
80.0	60.0	0.2667	0.3477
80.0	80.0	0.2389	0.3381
80.0	100.0	0.28	0.3256
100.0	20.0	0.2333	0.3643
100.0	40.0	0.25	0.3593
100.0	60.0	0.2667	0.343
100.0	80.0	0.26	0.3214
100.0	100.0	0.275	0.3375

Tabla 5.3: Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de ojo izquierdo, ojo derecho y tamaño de pupila. Se señala en negrita el caso que corresponde al menor error de clasificación.

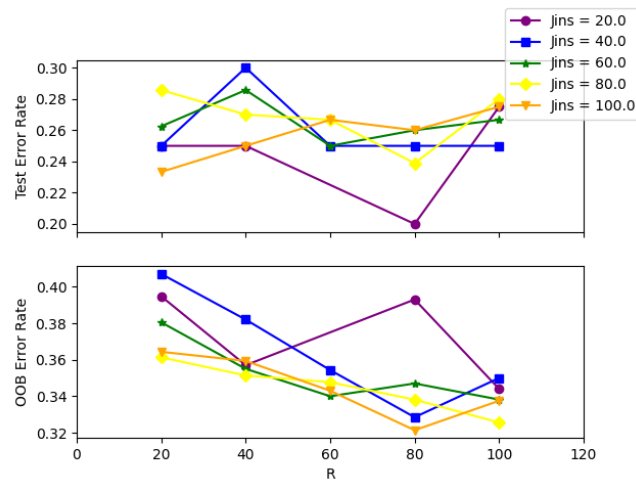


Figura 5.3: Grafica de error test y OOB para los atributos de ojo izquierdo, ojo derecho y tamaño de pupila.

Jins	R	Error	OOB
20.0	20.0	0.25	0.457
20.0	40.0	0.2875	0.4088
20.0	60.0	0.2833	0.4097
20.0	100.0	0.2833	0.3907
40.0	20.0	0.2833	0.4143
40.0	40.0	0.2875	0.3962
40.0	60.0	0.3	0.3944
40.0	80.0	0.25	0.379
40.0	100.0	0.3	0.4012
60.0	20.0	0.3167	0.3927
60.0	40.0	0.2875	0.3642
60.0	60.0	0.3	0.3586
60.0	80.0	0.3125	0.3795
60.0	100.0	0.25	0.375
80.0	20.0	0.3	0.407
80.0	40.0	0.3	0.3617
80.0	60.0	0.275	0.3392
80.0	80.0	0.29	0.3778
80.0	100.0	0.25	0.3783
100.0	20.0	0.3	0.3605
100.0	40.0	0.35	0.3857
100.0	60.0	0.2833	0.3691
100.0	80.0	0.2929	0.3621
100.0	100.0	0.26	0.3556

Tabla 5.4: Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de ojo izquierdo y tamaño de pupila.

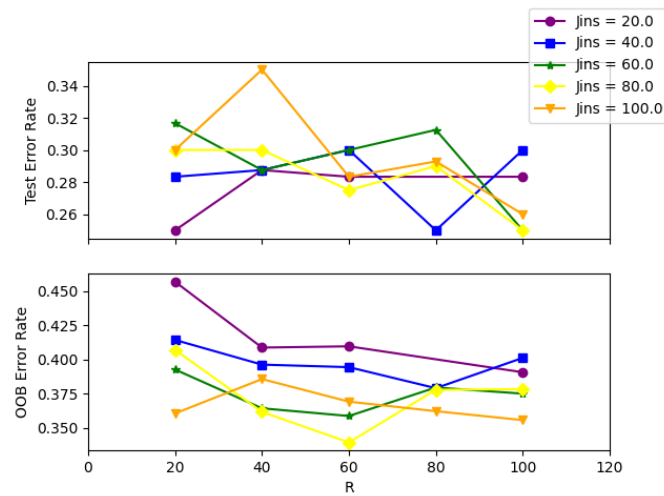


Figura 5.4: Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de Jins para los atributos de ojo izquierdo y tamaño de pupila.

Jins	R	Error	OOB
20.0	20.0	0.3	0.3875
20.0	40.0	0.3	0.3547
20.0	60.0	0.3	0.414
20.0	80.0	0.2	0.357
20.0	100.0	0.25	0.3597
40.0	20.0	0.2875	0.3928
40.0	40.0	0.3	0.357
40.0	60.0	0.2875	0.3698
40.0	100.0	0.25	0.382
60.0	20.0	0.3	0.35
60.0	40.0	0.3	0.375
60.0	60.0	0.2875	0.3502
60.0	80.0	0.2833	0.3627
60.0	100.0	0.28	0.353
80.0	20.0	0.29	0.3758
80.0	40.0	0.3	0.3572
80.0	60.0	0.3	0.3645
80.0	80.0	0.3	0.3823
80.0	100.0	0.2722	0.35
100.0	20.0	0.3	0.3857
100.0	40.0	0.3	0.3514
100.0	60.0	0.2833	0.3523
100.0	80.0	0.28	0.3726
100.0	100.0	0.2833	0.3562

Tabla 5.5: Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de media de los ojos y tamaño de pupila.

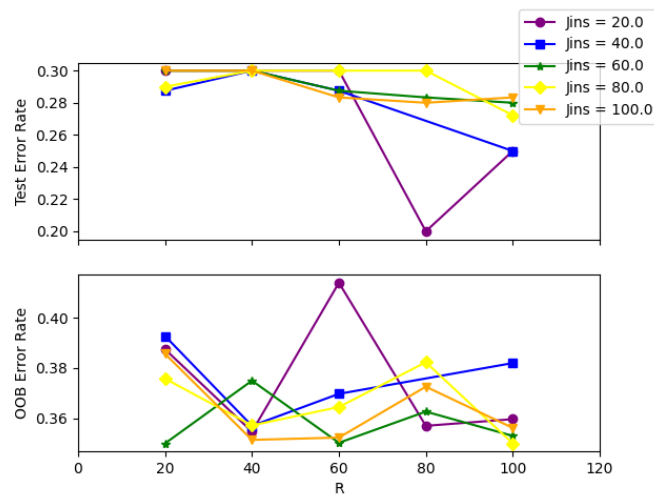


Figura 5.5: Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de Jins para los atributos de media de los dos ojos y tamaño de pupila.

Jins	R	Error	OOB
20.0	20.0	0.3167	0.4213
20.0	40.0	0.325	0.3895
20.0	80.0	0.325	0.3785
20.0	100.0	0.3	0.3547
40.0	20.0	0.3125	0.3802
40.0	40.0	0.3167	0.3778
40.0	60.0	0.3333	0.355
40.0	80.0	0.3	0.343
40.0	100.0	0.35	0.336
60.0	20.0	0.31	0.3698
60.0	40.0	0.3	0.35
60.0	60.0	0.3083	0.3607
60.0	80.0	0.325	0.3535
60.0	100.0	0.33	0.38
80.0	20.0	0.3062	0.3706
80.0	40.0	0.3	0.3542
80.0	60.0	0.3	0.3302
80.0	80.0	0.28	0.35
80.0	100.0	0.2875	0.3715
100.0	20.0	0.3	0.3607
100.0	40.0	0.3333	0.3667
100.0	60.0	0.3125	0.3338
100.0	80.0	0.3071	0.3274
100.0	100.0	0.3083	0.3452

Tabla 5.6: Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R del atributo de la señal ocular referente al tamaño de la pupila.

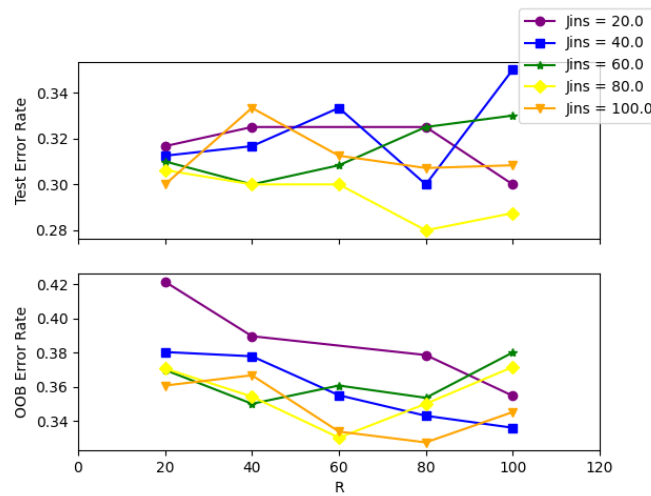


Figura 5.6: Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de Jins para el atributo tamaño de pupila.

Jins	R	Error	OOB
20.0	20.0	0.3	0.329
20.0	40.0	0.275	0.3425
20.0	60.0	0.3	0.393
20.0	100.0	0.3	0.354
40.0	20.0	0.275	0.3965
40.0	40.0	0.28	0.3514
40.0	60.0	0.2833	0.393
40.0	80.0	0.275	0.332
40.0	100.0	0.225	0.389
60.0	20.0	0.3	0.3523
60.0	40.0	0.3	0.375
60.0	60.0	0.2833	0.3643
60.0	80.0	0.27	0.3284
60.0	100.0	0.2667	0.3403
80.0	20.0	0.29	0.3916
80.0	40.0	0.3	0.3573
80.0	60.0	0.2929	0.3631
80.0	80.0	0.3	0.3588
80.0	100.0	0.26	0.3542
100.0	20.0	0.3	0.3787
100.0	40.0	0.29	0.3499
100.0	60.0	0.2833	0.344
100.0	80.0	0.275	0.3499
100.0	100.0	0.2833	0.3453

Tabla 5.7: Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de ojo derecho tamaño de pupila.

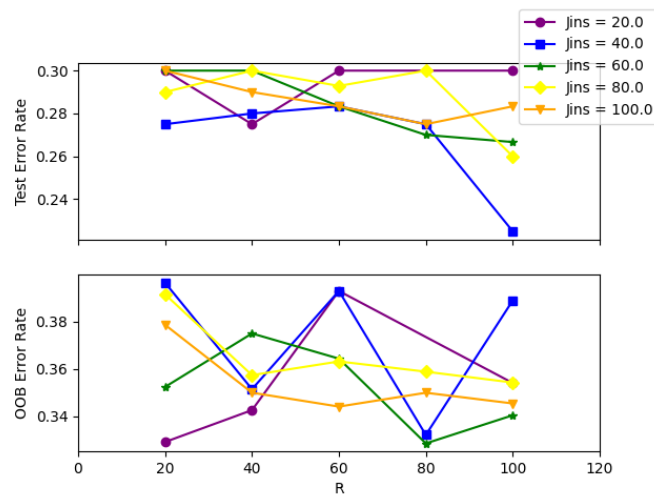


Figura 5.7: Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de Jins para los atributos ojo derecho y tamaño de pupila.

Jins	R	Error	OOB
20.0	20.0	0.3833	0.5647
20.0	40.0	0.375	0.5855
20.0	100.0	0.35	0.529
40.0	20.0	0.45	0.571
40.0	40.0	0.3375	0.5465
40.0	60.0	0.4167	0.552
40.0	80.0	0.375	0.5035
40.0	100.0	0.35	0.5462
60.0	40.0	0.425	0.575
60.0	60.0	0.325	0.5355
60.0	80.0	0.37	0.5398
60.0	100.0	0.33	0.4958
80.0	20.0	0.35	0.6175
80.0	40.0	0.275	0.5145
80.0	60.0	0.35	0.541
80.0	80.0	0.2857	0.5154
80.0	100.0	0.3438	0.4892
100.0	20.0	0.3667	0.5785
100.0	40.0	0.3167	0.505
100.0	60.0	0.3167	0.5153
100.0	80.0	0.3182	0.5099
100.0	100.0	0.3167	0.5174

Tabla 5.8: Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de ojo derecho y ojo izquierdo.

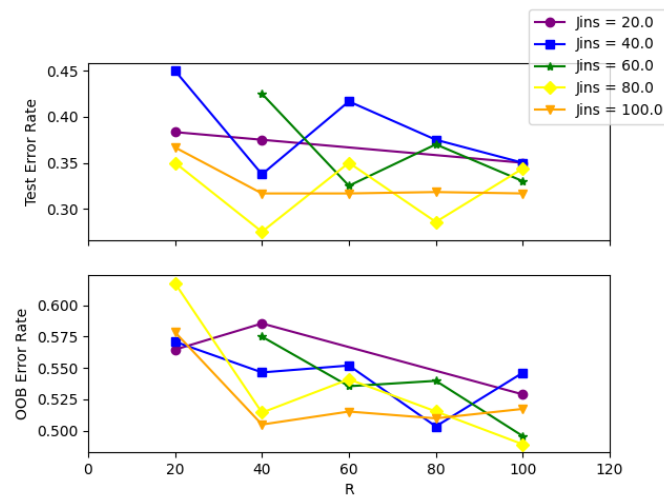


Figura 5.8: Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de Jins para los atributos ojo derecho y ojo izquierdo.

Jins	R	Error	OOB
20.0	20.0	0.5	0.614
20.0	40.0	0.3833	0.6213
20.0	60.0	0.2	0.564
20.0	100.0	0.4	0.586
40.0	20.0	0.45	0.6
40.0	40.0	0.375	0.582
40.0	60.0	0.375	0.5425
40.0	80.0	0.4	0.5162
40.0	100.0	0.375	0.5322
60.0	20.0	0.45	0.574
60.0	40.0	0.3417	0.5382
60.0	60.0	0.39	0.55
60.0	80.0	0.34	0.5286
60.0	100.0	0.3071	0.505
80.0	20.0	0.4333	0.5883
80.0	40.0	0.3667	0.5383
80.0	60.0	0.36	0.5186
80.0	80.0	0.3417	0.524
80.0	100.0	0.35	0.4858
100.0	20.0	0.425	0.532
100.0	40.0	0.37	0.5316
100.0	60.0	0.3667	0.469
100.0	80.0	0.3571	0.5134
100.0	100.0	0.37	0.5134

Tabla 5.9: Resultados de error de test y OOB de la clasificación de los resultados de las series temporales en base a Jins variando R de los atributos de la señal ocular correspondientes a los valores de media de los ojos, ojo derecho y ojo izquierdo.

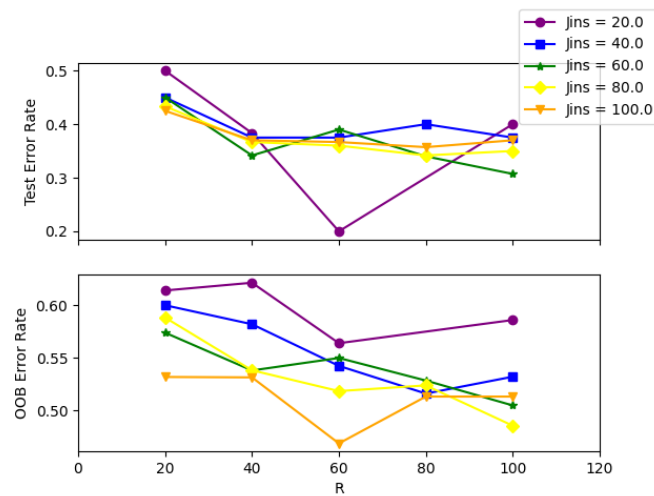


Figura 5.9: Gráfica de error test y OOB en función de R y de los valores de Jins para los atributos media de los ojos, ojo izquierdo, ojo derecho.

a procesos cognitivos como pueden ser la atención, el esfuerzo mental, o el procesamiento cognitivo, en estas pruebas provocados concretamente por la lectura de textos [39, 40], indicándonos que el tamaño de la pupila es un parámetro que afecta de forma positiva a la clasificación a partir de patrones oculares.

También observamos que la clasificación de los lectores utilizando como único atributo la variación del tamaño de la pupila durante la lectura mostrada en la Tabla 5.6, genera una de las peores clasificaciones. Esto indica como el valor de la pupila en conjunto a otros atributos, aporta un valor positivo a la clasificación, favoreciendo la mejora de los resultados al ser combinado con otros atributos referentes al movimiento ocular, como se puede ver en las Tablas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 y 5.7, sin ser suficientemente informativo y aclarador a nivel individual como único atributo de entrada.

Observando los resultados de las distintas clasificaciones, podemos ver como el error tiende a ser menor cuando R se encuentra entre los valores más altos introducidos, como se puede ver en la Tabla 5.1. Este dato indica la complejidad de la serie temporal que representa el movimiento ocular y la necesidad de tener un alfabeto de símbolos grande para poder obtener una traducción representativa de la misma para mejorar la clasificación.

Se puede apreciar que los mejores resultados corresponden con los de la prueba que realiza la clasificación con todos los atributos a excepción de la media de los dos ojos, mostrados en la Tabla 5.3 y la Figura 5.3, obteniéndose en este caso el menor valor tanto para el error de test como el error OOB.

El hecho de que omitiendo la media de los ojos se obtenga mejor resultado que con todos los atributos disponibles, nos hace plantearnos la aportación de este atributo en la clasificación, siendo un atributo redundante al partir de la media de la información del ojo derecho y el ojo izquierdo pero no conteniendo la totalidad de su información, lo que puede provocar la pérdida de patrones que permitan la diferenciación de las señales y por ende reducir la tasa de acierto del clasificador con su uso.

6

Conclusiones

6.1. Conclusiones

El objetivo inicial de este Trabajo de Fin de Máster era diseñar y validar una aplicación y un protocolo de registro y clasificación de series temporales multivariadas de seguimiento ocular durante la lectura de textos para la recomendación de diagnóstico de dislexia. Los datos se iban a recoger en un entorno hospitalario con un número elevado de niños con diagnóstico y niños sanos.

Al no poder realizar las pruebas planteadas en el hospital debido a la situación sanitaria actual, se ha realizado un análisis a partir de una prueba piloto alternativa. Esta prueba tenía como objetivo validar que es posible clasificar el patrón de lectura de cada individuo siguiendo el mismo protocolo de lectura breve de textos que en la prueba hospitalaria, y la correspondiente clasificación de las series temporales registradas con la aplicación mediante el algoritmo SMTS basado en Random Forest.

En la sección de resultados hemos observado cómo a partir de las pruebas realizadas se ha conseguido obtener una clasificación que alcanza valores cercanos al 80% de acierto en la identificación del lector a partir del patrón de lectura breve en las mejores configuraciones. La variabilidad en el error es grande en algunas configuraciones del algoritmo de clasificación y de su parametrización, posiblemente debido a la cantidad relativamente baja de muestras en el proyecto piloto y al tamaño de las muestras considerado. Globalmente, los resultados indican que las series temporales de seguimiento ocular con su estructura temporal íntegra pueden utilizarse como fuente de entrada a un clasificador, conteniendo información relevante incluso sin realizar un procesamiento o extraer valores mediados.

Los resultados también nos hacen concluir que, aunque los resultados hayan indicado que se ha realizado una clasificación satisfactoria en la mayoría de los casos, para un tipo de registro como la identificación de patrones oculares, es necesario recabar una mayor cantidad de muestras, tanto de voluntarios como de lecturas realizadas. Por un lado es necesaria que la prueba de lectura no sea muy larga para no hacerla pesada, pero por otro tiene que recoger la suficiente variabilidad en los patrones de lectura en relación a los objetivos de la clasificación.

Por último, el hecho de que se haya realizado una clasificación correcta en la mayoría de casos, es una buena premisa para el uso de la señal ocular para la recomendación de diagnóstico de dislexia, aunque por supuesto es necesaria la validación con un conjunto de entrenamiento y de test adecuados que consideren pacientes y niños sanos.

6.2. Trabajo futuro

El trabajo futuro planteado a corto plazo consistirá en poder realizar la prueba planteada inicialmente en entornos hospitalarios donde podamos entrenar un clasificador con datos de niños que padecen dislexia y niños sanos y así poder validar la herramienta y el protocolo desarrollado para la recomendación de diagnóstico a partir de las series temporales de seguimiento ocular registradas. También se podrá comprobar la eficiencia de otros métodos para realizar la clasificación de series temporales de movimiento ocular que preserven su estructura temporal [26, 41, 42, 43] con los resultados obtenidos con el algoritmo SMTS.

A medio y largo plazo plantearíamos el uso de dispositivos de seguimiento ocular de bajo coste que permitan la mejor propagación de esta tecnología en la recomendación de diagnóstico de enfermedades y su implantación universal en tabletas y lectores electrónicos. Adicionalmente, se plantearía la realización de recomendación de diagnóstico de otras enfermedades de carácter cognitivo, como podría ser el déficit de atención, y así permitir detección precoz, siendo el objetivo final el uso de estas tecnologías en un ámbito de desarrollo, como un colegio o un centro educativo.

Finalmente, las pruebas realizadas en el proyecto piloto sugieren el uso de la clasificación del seguimiento ocular como técnica biométrica para la identificación continua de usuarios, así como en otras aplicaciones relacionadas con el reconociendo contextual de cada persona. Estos estudios se podrían realizar no solo con patrones de lectura, sino también de navegación y visualización en distintos tipos de actividades.

Bibliografía

- [1] Edwin G Boring. «Review of Helmholtz's treatise on physiological optics». En: *Psychological Bulletin* 23.6 (1926), 323–326.
- [2] Andrew T Duchowski. *Eye tracking methodology: Theory and practice*. 2017.
- [3] Roger M. Cooper. «The control of eye fixation by the meaning of spoken language: A new methodology for the real-time investigation of speech perception, memory, and language processing». En: *Cognitive Psychology* 6.1 (1974), págs. 84 -107. ISSN: 0010-0285. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(74\)90005-X](https://doi.org/10.1016/0010-0285(74)90005-X). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001002857490005X>.
- [4] Geer Teng y col. «Design and development of human computer interface using electrooculogram with deep learning». En: *Artificial Intelligence in Medicine* 102 (2020), pág. 101765.
- [5] Jing Xiao, Jun Qu y Yuanqing Li. «An Electrooculogram-based interaction method and its music-on-demand application in a virtual reality environment». En: *IEEE Access* 7 (2019), págs. 22059-22070.
- [6] Alessandro Tonin y col. «Auditory electrooculogram-based communication System for ALS patients in transition from Locked-in to complete Locked-in State». En: *Scientific Reports* 10.1 (2020), págs. 1-10.
- [7] D Rozado y col. «Controlling a Smartphone Using Gaze Gestures as the Input Mechanism». En: *Human-Computer Interaction* 30.1 (2015), págs. 34-63. ISSN: 0737-0024. DOI: 10.1080/07370024.2013.870385. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/07370024.2013.870385>.
- [8] Ling Tao y col. «Eye tracking metrics to screen and assess cognitive impairment in patients with neurological disorders». En: *Neurological Sciences* 41.7 (2020), págs. 1697-1704. ISSN: 1590-3478. DOI: 10.1007/s10072-020-04310-y. URL: <https://doi.org/10.1007/s10072-020-04310-y>.
- [9] Carol McDonald Connor y col. «Individual differences in fifth graders' literacy and academic language predict comprehension monitoring development: An eye-movement study». En: *Scientific Studies of Reading* 19.2 (2015), págs. 114-134.
- [10] Aline Godroid y col. «Incidental vocabulary learning in a natural reading context: an eye-tracking study». En: *Bilingualism: Language and Cognition* 21.3 (2018), 563–584. DOI: 10.1017/S1366728917000219.

- [11] Christian Pfeiffer y col. «Neural dynamics of sentiment processing during naturalistic sentence reading». En: *NeuroImage* 218 (2020), pág. 116934. ISSN: 1053-8119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2020.116934>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811920304201>.
- [12] Tilke Judd y col. «Learning to predict where humans look». En: *2009 IEEE 12th international conference on computer vision*. IEEE. 2009, págs. 2106-2113.
- [13] Michael Dorr y col. «Variability of eye movements when viewing dynamic natural scenes». En: *Journal of vision* 10.10 (2010), págs. 28-28.
- [14] Ali Borji y col. «Salient object detection: A survey». En: *Computational visual media* (2019), págs. 1-34.
- [15] Angelica Cerulli y col. «Evaluation of eye movements pattern during reading process in patients with glaucoma: a microperimeter study». En: *European Journal of Ophthalmology* 24.3 (2014), págs. 358-363.
- [16] Michael Murias y col. «Validation of eye-tracking measures of social attention as a potential biomarker for autism clinical trials». En: *Autism Research* 11.1 (2018), págs. 166-174.
- [17] Fiona C Glen, Nicholas D Smith y David P Crabb. «Saccadic eye movements and face recognition performance in patients with central glaucomatous visual field defects». En: *Vision Research* 82 (2013), págs. 42-51.
- [18] Yu Jia WU y col. «Eye-movement Patterns of Chinese Children with Developmental Dyslexia during the Stroop Test». En: *Biomedical and Environmental Sciences* 31.9 (2018), págs. 677-685.
- [19] Ling Tao y col. «Eye tracking metrics to screen and assess cognitive impairment in patients with neurological disorders». En: *Neurological Sciences* (2020), págs. 1-8.
- [20] Donald L Compton. «Focusing Our View of Dyslexia Through a Multifactorial Lens: A Commentary». En: *Learning Disability Quarterly* (2020), pág. 0731948720939009.
- [21] CA Rubino y HA Minden. «An analysis of eye-movements in children with a reading disability.» En: *Cortex: A Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior* (1973).
- [22] Mattias Nilsson Benfatto y col. «Screening for dyslexia using eye tracking during reading». En: *PloS one* 11.12 (2016), e0165508.
- [23] Goutam Chakraborty y Zong Han Wu. «Analysis of Time-Series Eye-Tracking Data to Classify and Quantify Reading Ability». En: *Advances in Time Series Analysis and Forecasting* (2017), pág. 375.
- [24] Lyad Batal y col. «Multivariate time series classification with temporal abstractions». En: *Proceedings of the 22nd International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference, FLAIRS-22*. University of Pittsburgh. 2009, págs. 344-349.
- [25] Anthony Bagnall y col. «The great time series classification bake off: a review and experimental evaluation of recent algorithmic advances». En: *Data Mining and Knowledge Discovery* 31.3 (2017), págs. 606-660.

-
- [26] Amaia Abanda, Usue Mori y Jose A. Lozano. «A review on distance based time series classification». En: *Data Mining and Knowledge Discovery* 33.2 (2019), págs. 378-412. ISSN: 1573756X. DOI: 10.1007/s10618-018-0596-4.
- [27] David Rozado, Francisco B. Rodriguez y Pablo Varona. «Low cost remote gaze gesture recognition in real time». En: *Applied Soft Computing* 12.8 (2012), págs. 2072 -2084. ISSN: 1568-4946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.02.023>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494612001159>.
- [28] David Rozado y col. «Gliding and saccadic gaze gesture recognition in real time». En: *ACM Trans. Interact. Intell. Syst.* 1.2 (2012), 10:1-10:27. ISSN: 2160-6455. DOI: 10.1145/2070719.2070723. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2070719.2070723>.
- [29] Arash Gharehbaghi y Maria Lindén. «A deep machine learning method for classifying cyclic time series of biological signals using time-growing neural network». En: *IEEE transactions on neural networks and learning systems* 29.9 (2017), págs. 4102-4115.
- [30] Hassan Ismail Fawaz y col. «Deep learning for time series classification: a review». En: *Data Mining and Knowledge Discovery* 33.4 (2019), págs. 917-963.
- [31] Anthony Bagnall y col. «Time-series classification with COTE: The collective of transformation-based ensembles». En: *2016 IEEE 32nd International Conference on Data Engineering (ICDE)*. IEEE. 2016, págs. 1548-1549.
- [32] Jason Lines, Sarah Taylor y Anthony Bagnall. «Time series classification with HIVE-COTE: The hierarchical vote collective of transformation-based ensembles». En: *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data* 12.5 (2018).
- [33] Mustafa Gokce Baydogan y George Runger. «Learning a symbolic representation for multivariate time series classification». En: *Data Mining and Knowledge Discovery* 29.2 (2015), págs. 400-422.
- [34] Katarzyna Harezlak, Pawel Kasprowski y Mateusz Stasch. «Towards accurate eye tracker calibration—methods and procedures». En: *Procedia Computer Science* 35 (2014), págs. 1073-1081.
- [35] Pawel Kasprowski, Katarzyna Hareźlak y Mateusz Stasch. «Guidelines for the eye tracker calibration using points of regard». En: *Information Technologies in Biomedicine, Volume 4*. Springer, 2014, págs. 225-236.
- [36] J Johnsson y R Matos. «Accuracy and precision test method for remote eye trackers». En: *Tobii Technology* (2011).
- [37] Edwin S. Dalmaijer, Sebastiaan Mathôt y Stefan Van der Stigchel. «PyGaze: An open-source, cross-platform toolbox for minimal-effort programming of eyetracking experiments». En: *Behavior Research Methods* 46.4 (2014), págs. 913-921. ISSN: 1554-3528. DOI: 10.3758/s13428-013-0422-2. URL: <http://link.springer.com/10.3758/s13428-013-0422-2>.
- [38] Gian Antonio Susto, Angelo Cenedese y Matteo Terzi. «Time-series classification methods: Review and applications to power systems data». En: *Big data application in power systems*. Elsevier, 2018, págs. 179-220.
-

- [39] Marcus Nyström, Ignace Hooge y Richard Andersson. «Pupil size influences the eye-tracker signal during saccades». En: *Vision Research* 121 (2016), págs. 95 -103. ISSN: 0042-6989. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.visres.2016.01.009>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698916000389>.
- [40] Benjamin T. Carter y Steven G. Luke. «Best practices in eye tracking research». En: *International Journal of Psychophysiology* 155 (2020), págs. 49 -62. ISSN: 0167-8760. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2020.05.010>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167876020301458>.
- [41] David Rozado, Francisco B. Rodriguez y Pablo Varona. «Optimizing Hierarchical Temporal Memory for Multivariable Time Series». En: *Artificial Neural Networks – ICANN 2010*. Ed. por Konstantinos Diamantaras, Wlodek Duch y Lazaros S. Iliadis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, págs. 506-518. ISBN: 978-3-642-15822-3. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-15822-3_62.
- [42] David Rozado, Francisco B. Rodriguez y Pablo Varona. «Extending the bioinspired hierarchical temporal memory paradigm for sign language recognition». En: *Neurocomputing* 79 (2012), págs. 75 -86. ISSN: 0925-2312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2011.10.005>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231211006230>.
- [43] Jon Hills y col. «Classification of time series by shapelet transformation». En: *Data Mining and Knowledge Discovery* 28.4 (2014), págs. 851-881. ISSN: 13845810. DOI: [10.1007/s10618-013-0322-1](https://doi.org/10.1007/s10618-013-0322-1).